

Sommaire

REMERCIEMENTS	i
Sommaire	iii
Signification des acronymes et abréviations	iv
Glossaire.....	v
Liste des figures	vi
Liste des photos	vii
Liste des tableaux	viii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : GENERALITES	2
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	3
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE FER ET L'OR	16
CONCLUSION PARTIELLE.....	30
PARTIE II : METHODOLOGIE	31
CHAPITRE 3 : METHODE DE TRAVAIL.....	32
CHAPITRE 4 : LE LEVER GEOPHYSIQUE	40
CONCLUSION PARTIELLE.....	48
PARTIE III : RESULTATS ET INTERPRETATION	49
CHAPITRE 5 : PRESENTATION DES RESULTATS	50
CHAPITRE 6 : INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSIONS	70
CONCLUSION GENERALE	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82
WEBOGRAPHIE.....	84
ANNEXES	82
TABLES DES MATIERES	IV

Signification des acronymes et abréviations

Abréviations

AEP : Adduction d'Eau Potable

CEG : Collège d'Enseignement Général

CSB : Centre de Santé de Base

ETR : Eléments de Terres Rares

EPP: Ecole Primaire Publique

FID : Fond d'Intervention pour le Développement

GPS : Global Positioning System

IOGA : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

LN : Lumière Naturelle

LP : Lumière Polarisée

n° : numéro

PGRM : Projet de Gouvernance des Ressources Minérales

RIP : Route d'Intérêt Provincial

WISCO : Wuhan Iron And Steel Corporation

Unités

% : pour cent

Ω m : ohm mètre

Ga : Milliards d'années

m : mètre

Ma : Millions d'années

mm : millimètre

Mt : Millions de tonnes

V : Volt

Glossaire

- acier : alliage de fer et de très faible quantité de carbone.
- acier inoxydable : acier contenant du chrome le rendant résistant à la corrosion.
- Chemocline : interface redox situé entre une zone supérieure (jusqu'à 60 mètres de profondeur) brassée et oxygénée (oxydant) et une zone profonde (entre 60 mètres et 92 mètres dépourvue d'oxygène (réducteur) d'un océan stratifié.
- Cinérites : roche pyroclastique, généralement tendre et poreuse, qui se forme par accumulation de cendres volcaniques en milieu le plus souvent continental, mais aussi marin, à des niveaux généralement bien stratifiés.
- Epithermal : s'applique aux gisements les plus superficiels (0 à 1,2 km)
- Fémique : se dit d'un minéral riche en fer et magnésium.
- Hypothermal : s'applique aux gisements formés à des profondeurs supérieures à 3,6km à des températures de 300 à 500°C.
- Mésothermal : s'applique à des gisements formés à des profondeurs comprises entre 1,2 et 3,6 km par des fluides de température comprise entre 200 et 300°C.
- Métasomatisme : résultat de la réaction d'une roche carbonatée avec un fluide hydrothermal de haute température, souvent, mais pas uniquement, d'origine magmatique.
- Skarn : altération hydrothermal liée à du métamorphisme de contact, bien développé surtout dans les carbonates.

Liste des figures

Figure 1 : carte de localisation de la zone d'étude, Commune Rurale d'Ambohidranandriana	4
Figure 2 : Carte de réseau hydrographique de la zone d'étude par digitalisation d'image Google Earth	6
Figure 3 : Les domaines et sous-domaines géologiques du Précambrien Malgache	12
Figure 4 : Extrait de la carte géologique feuille Antsirabe-Ambatolampy 1963 (1/200 000)	15
Figure 5 : carte géologique de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana	15
Figure 6 : Carte des indices de fer et des zones favorables à Madagascar (PGRM, 2012)....	23
Figure 7 : Or dans une veine de quartz.....	24
Figure 8 : Paillettes d'or	24
Figure 9 : Or natif, Venezuela.....	24
Figure 10 : Les principaux indices et zones aurifères à Madagascar (PGRM, 2012)	30
Figure 11 : organigramme de l'étude.....	32
Figure 12 : image de la zone d'étude obtenue sur Google Earth	34
Figure 13 : Carte de localisation des puits de reconnaissance	37
Figure 14 : différents types de dispositif d'acquisition de données en tomographie électrique	42
Figure 15 : Représentation de la séquence de mesure pour un dispositif de Wenner	43
Figure 16 : schéma de principe d'acquisition des mesures de résistivité et de chargeabilité ...	45
Figure 17 : Implantation des lignes de coupe géophysiques	46
Figure 18 : Coupe géologique suivant le trait AB.....	58
Figure 19 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après Besairie H.)	59
Figure 20 : échantillon de quartzite à oxyde fer en LN (x 5)	60
Figure 21 et 22 : échantillon de veine de quartz interstratifiée	61
Figure 23 : échantillon de veine sécante présentant des grandes plages de quartz.	62
Figure 24 : échantillon de veine sécante en LN	62
Figure 25 : Coupe géoélectrique du panneau 1 (profil AB).....	64
Figure 26 : Coupe géoélectrique du panneau 2 (profil CD).....	65
Figure 27 : Coupe géoélectrique du panneau 3 (profil EF).....	66
Figure 28 : carte d'isoteneur en Fe_2O_3 d'Ambohidranandriana.....	68
Figure 29 : Superposition des résultats d'analyse chimique à la carte géologique.....	69
Figure 30 : Forme géométrique des quartzites issue des profils tomographiques	70
Figure 31 : modèle de formation de la minéralisation ferrifère rubanée de Tongarivo	77

Liste des photos

Photo 1	: Morphologie générale de la zone d'étude	5
Photo 2	: Variation de la couleur des sols de la zone d'étude.....	36
Photo 3	: Le resistivimètre Syscal 1 et ses accessoires	44
Photo 4	: Implantation des électrodes	47
Photo 5	: électrode implanté relié au câble	47
Photo 6	: Branchement du câble multiélectrode au multinode.....	47
Photo 7	: câble multiélectrode branché au multinode branché.....	47
Photo 8	: Entretien avec les locaux	47
Photo 9	: Pegmatites graphiques en poche dans le gneiss.....	51
Photo 10	: ségrégation de quartz et feldspath.....	51
Photo 11	: aspect oillé du feldspath potassique dans le gneiss surmicacé	51
Photo 12	: bande de granite de 2 mètres dans la migmatite	51
Photo 13	: Bande graphiteuse (en gris) intercalée dans la migmatite	52
Photo 14	: Aspect lité du quartzite à oxyde de fer de Tongarivo	53
Photo 15	: Des quartzites à oxyde de fer en plaquettes	53
Photo 16	: Encroûtement en cuirasse ferrugineux.....	53
Photo 17	: galerie creusée de façon sécante aux foliations et disposition des plaquettes de quartzites à oxyde de fer.....	54
Photo 18	: aspect carié de la veine aurifère interstratifiée.....	54
Photo 19	: Le piton volcanique de Vontovorona.....	55
Photo 20	: un cristal d'orthose de 10 cm extrait du granite pegmatitique	56
Photo 21	: sédiments lacustres au pied de l'escarpement de Manandona a.....	56
Photo 22	: fractures observées sur les quartzites	57
Photo 23	: plissement du quartzite	58
Photo 24	: boudinage d'amphibolite dans du gneiss.....	58
Photo 25	: Echantillon de BIF provenant du gisement de F'Derik, KEDIA D'IJIL	74
Photo 26	: Echantillon de quartzite à oxyde de fer de Tongarivo	74
Photo 27	: Affleurement de minerai en plaquette, gisement de F'Derik, Kedia d'Ijil	75
Photo 28	: Affleurement de quartzites à oxyde de fer de Tongarivo	75

Liste des tableaux

Tableau 1	: Ordre chronologique d'émission des roches de l'Ankaratra (Bésairie, 1957)	13
Tableau 2	: Les propriétés physiques et chimiques du fer	16
Tableau 3	: Caractéristiques des principaux gisements et gîtes de minerai de fer à Madagascar	22
Tableau 4	: Paramètres de précipitation de l'or mésothermal (Source : Harcouet 2005)	26
Tableau 5	: caractéristiques physiques des puits de reconnaissance	36
Tableau 6	: Caractéristiques des échantillons utilisés pour la confection de lames minces...	39
Tableau 7	: caractéristiques des profils électriques réalisés	46
Tableau 8	: Résultats d'analyse chimique d'oxyde de fer	67
Tableau 9	: Résultat de calcul du volume de minerai d'oxydes de fer	71
Tableau 10	: Teneur moyenne en oxyde de fer de la zone potentielle de Tongarivo.....	72

INTRODUCTION

On entend souvent dire que Madagascar est un pays riche en ressources minérales. Cela est vrai malgré que la situation économique actuelle de Madagascar semble montrer le contraire ; les gisements, gîtes et surtout indices de minéralisation sont abondants. Parmi ces indices, nombreux sont ceux qui n'ont pas encore fait l'objet d'études approfondies. Notre zone d'étude, qui est la Commune Rurale d'Ambohidranandriana en fait partie. Elle est connue depuis longtemps pour l'or de Tongarivo, un des fokontany de la Commune, et a déjà même été sujet d'une petite exploitation artisanale avant 1911.

Par ailleurs, la société Holcim Ibity y détient actuellement un permis d'exploitation d'oxydes de fer qui sont contenus dans les quartzites de Tongarivo, encaissants de la minéralisation aurifère. Jusqu'à présent, aucune étude concernant ces oxydes de fer n'a encore été présentée.

En effet, ce travail essaie d'apporter quelques informations sur la connaissance de ces minéralisations en fer et or d'où le thème de ce Mémoire : « Caractérisation et relation entre les gîtes ferrifère et aurifère de Tongarivo, Commune Rurale d'Ambohidranandriana, District Antsirabe II ». Notre objectif est de caractériser les quartzites à oxydes de fer à travers des études physico-chimiques et pétrographiques et de voir s'il existe une relation entre les deux minéralisations à savoir l'oxyde de fer et l'or. Cela conduira en premier lieu à l'établissement d'une carte géologique à plus grande échelle pour une meilleure appréciation géologique de la zone d'étude. Après avoir définie la zone à oxyde de fer, une évaluation sommaire de la quantité ou réserve en oxyde de fer est effectuée afin de déterminer son exploitabilité. Enfin, un modèle de mise en place de chaque minéralisation sera proposé.

L'ouvrage se subdivisera alors en trois grandes parties avec deux chapitres chacune :

- La première partie décrit la zone d'étude et son contexte géologique ainsi que des généralités sur les substances concernés par cette étude en occurrence le fer et l'or ;
- La deuxième détaille la méthodologie du travail qui consiste en une étude cartographique, pétrographique, géophysique et chimique ;
- Dans la troisième partie seront présentés tous les résultats de ces investigations et la corrélation de ceux-ci permettant l'évaluation de la rentabilité de l'exploitation des oxydes de fer et proposition d'un modèle de mise en place des minéralisations ferrifère et aurifère de Tongarivo Ambohidranandriana.

PARTIE I :

GENERALITES

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, MORPHOLOGIQUE ET ECONOMIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1. Géographie administrative

La zone étudiée est la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, située à environ 110 km à vol d'oiseau au Sud d'Antananarivo et à 21 km à l'Est d'Antsirabe. On y accède en suivant la RN7 depuis Antananarivo à Antsirabe, puis en prenant la RIP 122 reliant Antsirabe - Soanindrariny. La Commune est située entre 19°51,6' et 19°57,6' de latitude Sud et 47°04,2' et 47°13,2' de longitude Est. Le Chef-lieu de la Commune a pour coordonnées 19°53'39,95''S et 47°09'37,43''E.

Administrativement, la Commune Rurale d'Ambohidranandriana appartient au District d'Antsirabe II, Région Vakinankaratra. Elle est limitée au Nord par la Commune Rurale d'Ambohimiarivo, à l'Est par la Commune Rurale de Soanindrariny, au Sud par la Commune Rurale d'Ambohitsimanova et à l'Ouest par la Commune Urbaine d'Antsirabe I (figure 1).

D'une superficie de 182 km², la Commune est composée de dix fokontany dont : Ambohimandroso, Ambohimarina, Anosibe, Antsahavory, Fanjakamandroso, Miandrisoa Tsarahonenana, Miarinarivo Ambohidranandriana, Soamonina, Tsaramody et Tongarivo. C'est dans ce dernier qu'est localisée la minéralisation aurifère et ferrifère sujet de l'étude.

I.1.2. Géographie physique

I.1.2.1. Relief [23]

Le relief de la Région Vakinankaratra, cadre physique de notre zone d'étude, se distingue par une altitude plus élevée et il est dominé par des sols volcaniques comprenant plusieurs bassins aménagés : Ambohibary, Antanifotsy, Antsirabe et Faratsiho. Cette région s'identifie aussi à trois ensembles naturels :

- Le centre est caractérisé par le massif volcanique de l'Ankaratra (où se trouve la plus haute altitude de l'ex-Province d'Antananarivo qui culmine à 2 644 mètres, le Tsiafajavona). La chaîne de l'Ankaratra constitue la limite occidentale du bassin d'Antsirabe tandis que la limite orientale est formée par les grands escarpements du Betampona et de Mandray.

CARTE DE LOCALISATION DE LA COMMUNE RURALE D'AMBOHIDRANANDRIANA

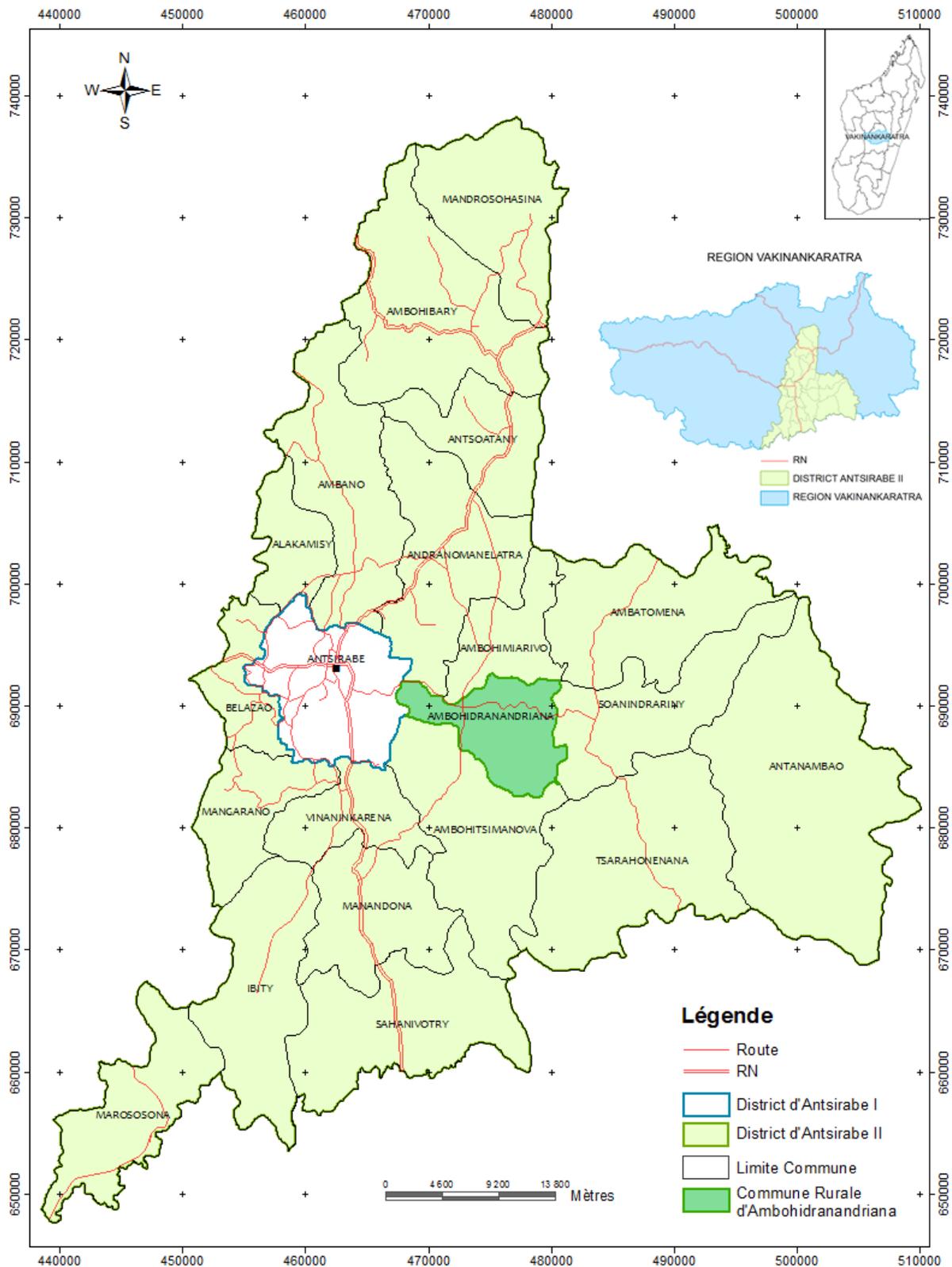


Figure 1 : carte de localisation de la zone d'étude, Commune Rurale d'Ambohidranandriana

- Au sud, la constitution de l'Ankaratra a provoqué dans la partie occidentale une série d'effondrements favorisant la formation de dépressions à fond alluvial et présentant de nombreux cratères et lacs. La zone méridionale, dominée par la chaîne de l'Ibity est constituée d'une succession de petites cuvettes au sol sableux, jonché de blocs de quartzite de toute taille ;
- Le Moyen Ouest est constitué par la pénéplaine de Mandoto-Ramaritina et où l'altitude s'abaisse à 1 000 m.

Particulièrement, la Commune Rurale d'Ambohidranandriana appartient à la partie orientale de Vakinankaratra, entre les escarpements de Mandray et de Betampona. La morphologie de la zone de la Commune est en général divisée en deux : la basse colline à l'Ouest et la haute colline à l'Est (Photo 1). La basse colline est constituée d'une vaste pénéplaine et d'une plaine rizicole ; par contre la partie orientale est dominée par des versants abrupts. Le massif de l'Angavo y culmine avec une altitude de 1918 m.



Photo 1 : Morphologie générale de la zone d'étude

I.1.2.2. Hydrographie [23]

Dans l'ensemble, le réseau hydrographique de la Région de Vakinankaratra semble dense et assez hiérarchisé. Les rivières peuvent être classées en deux groupes : celles qui prennent leur source dans l'Ankaratra et celles qui naissent dans les montagnes situées à l'Est.

En effet, plusieurs cours d'eau et rivières traversent la Commune Rurale d'Ambohidranandriana (figure 2). La population puise de l'eau dans la rivière de Fitamafy à Ambohimandroso et celles de l'Angavo et de l'Ifasina pour Tsaramody. La rivière

Manandona traverse les Fokontany d'Ambohimarina, de Soamonina, de Tsaramody et de Miarinarivo. Les cours d'eau d'Ambohimamory et d'Ambatomainty irriguent le Fokontany de Miandrisoa Tsarahonenana.

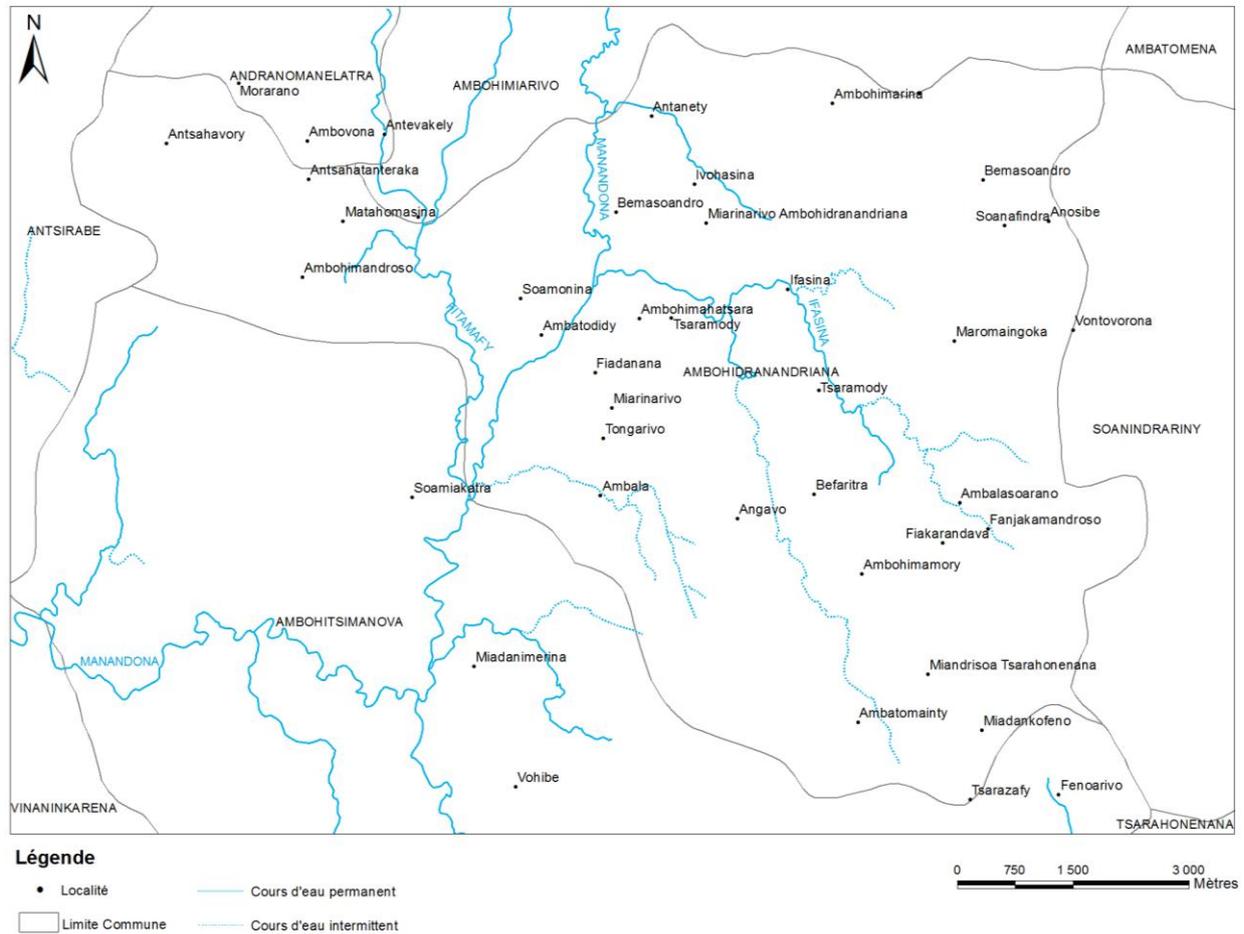


Figure 2 : Carte de réseau hydrographique de la zone d'étude par digitalisation d'image Google Earth

I.1.2.3. Climat et pluviométrie [23]

La Région Vakinankaratra est la Région qui a la température la plus fraîche de Madagascar. Son climat est de type « tropical d'altitude », supérieure à 900 mètres. Dans les parties élevées du Centre et de l'Est auquel appartient le district d'Antsirabe II qui comporte notre zone d'étude, les températures moyennes se situent autour de 13°C. En effet, à Ambohidranandriana, la température moyenne annuelle est de 15°C avec un maxima de 24°C (Novembre) et un minima pouvant aller jusqu'à 4,8°C (Juillet), données sur 19 ans.

Ce régime climatique humide froid de la Région Vakinankaratra en général et de la zone d'étude en particulier se répartit en trois saisons distinctes :

- la saison pluvieuse et chaude : d'Octobre à Avril ;
- la saison sèche et froide : de Mai à Juillet ;
- l'intersaison, sèche et relativement chaude, qui dure deux mois environ, d'Août à Septembre.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 1365 mm sur une période de 29 ans.

I.1.2.4. Végétation et sols [18]

Dans la partie orientale du Vakinankaratra, la végétation est dominée par les graminées dont l'Acacia dealbata communément appelé mimosas, puis le Pennisetum Alopecuros (Horompotsy), l'Arundinella stipoides (Haravola) et l'Hélichrysum gymnocephalum (Rambiazina). Les seules forêts existantes sont des forêts de reboisement de Pinus patula localisées sur les escarpements du Mandray et de Betampona et également sur les versants des cônes volcaniques quand ils ne sont pas cultivés par l'homme.

Sur le plan pédologique, le Vakinankaratra est connu pour ses sols fertiles. Les sols développés sur roches volcaniques ont des propriétés physiques plus favorables aux cultures par rapport aux sols développés sur le socle. Mais dans la partie orientale de la région, on trouve des sols peu évolués de profil A/C le long des escarpements du Mandray et de Betampona ou dans les régions situées à plus de 2 000 m d'altitude où ils sont très humifères grâce aux conditions climatiques froides et humides.

I.1.3. Géographie humaine et économique

I.1.3.1. Population

La population, constituée en majeure partie par de Merina, compte 14 487 habitants en 2010 soit une densité de 184 habitants au km².

On peut dire que la population d'Ambohidranandriana est relativement jeune puisqu'environ 51% de la population est moins de 18 ans. C'est aussi une population active car le nombre des individus d'âge entre 10 et 60 ans atteint plus de 54 %. L'effectif des femmes est légèrement supérieur à celui des hommes et cette population féminine représente les 51,3% de la population totale.

Le Fokontany de Miandrisoa Tsarahonenana s'avère le plus peuplé de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana avec environ 2 200 habitants. Celui de Tsaramody est le moins peuplé avec seulement 1 500 habitants.

I.1.3.2. Infrastructures de bases existantes

▪ Ecole : chaque fokontany de la Commune d'Ambohidranandriana possède une EPP donnant un total de dix EPP. Trois écoles privées sont recensées. Le Chef-lieu de la Commune abrite un CEG construit par le FID et un lycée construit récemment.

▪ Infrastructures sanitaires : la Commune possède deux CSB sis au Chef-lieu de la Commune et à Fanjakamandroso. Le premier centre dispose d'un médecin et d'une sage-femme tandis que le second ne connaît qu'une sage-femme.

▪ Infrastructures d'AEP : malgré que la Commune soit dotée d'un AEP depuis 2014, cela reste insuffisant. La plupart de la population s'approvisionne en eau soit par les sources, soit par l'eau de rivière, soit par des puits traditionnels. La collecte des eaux pluviales ruisselant sur les toits des habitations est une pratique courante. L'eau de rivière est utilisée pour les bains et la lessive.

▪ Infrastructure routière : le réseau routier se compose de la RIP 122 d'une longueur de 30 km (Antsirabe-Soanindrariny), à moitié praticable. 20 km de pistes rurales sont accessibles toute l'année et 15 km ont été réhabilités (tronçon Fanjakamandroso-Mandrohasina). Pour le transport, il n'y a pas de terminus de taxi-brousse au niveau de la Commune mais les automobiles de la coopérative FIFIMAVA y passent et desservent celle-ci.

I.1.3.3. Principales activités économiques

• L'agriculture : constitue l'activité principale de la population de la Commune. Les conditions climatiques et agro-écologiques sont propices à la production de diverses cultures qui peuvent être obtenues aussi bien sous climat tropical chaud (riz, maïs, manioc, soja, haricot...) que sous climat tempéré (pomme de terre, blé, avoine, pommiers, pêchers...).

• L'élevage : tient une place importante dans la vie sociale et économique des paysans de la Commune. Il vient au second rang après les activités agricoles. Le gros élevage est principalement caractérisé par l'élevage de bovin et le petit élevage par celui des porcins, des ovins et des volailles. Le cheptel bovin est élevé de manière semi-extensive avec une intégration du système agro-pastoral. A cet effet, l'élevage procure l'énergie et la fumure nécessaire à la production agricole et en retour, l'agriculture fournit les résidus de récolte et de cultures destinées à l'alimentation du bétail. La sériciculture est initiée au niveau d'une famille dans le Fokontany de Miarinarivo. Le mode d'élevage est encore traditionnel.

• L'orpaillage : a fait depuis quelques temps partie des sources de revenus de la population. L'or est soit livré à un collecteur soit vendu directement à Antsirabe par les orpailleurs.

I.1.3.4. Regard sur les ressources minérales et activités minières [5]

D'après un ouvrage écrit par Besairie en 1962 intitulé « Géologie économique de la préfecture d'Antsirabe », les ressources minérales présentes dans la zone d'étude sont l'or et le graphite. Il mentionne que des travaux d'exploitation de l'or ont déjà été entrepris à Tongarivo, un des fokontany de la Commune d'Ambohidranandriana, situé au Sud-Ouest. Il y est rapporté qu'il y existait trois veines de quartz interstratifiées, parallèles, de pendage 70°. La première, dite « filon de la crevasse » avait été mise à jour par des travaux superficiels qui avaient fourni 10 kg d'or ; elle fit l'objet d'une galerie en direction N-S puis d'un puits dit « puits de l'Est » qui, à 6 mètres de profondeur, a recoupé une veine assez riche qui avait une épaisseur de 0,5m. Un autre puits à l'Ouest a recoupé la même veine qui montrait une épaisseur de 0,6m de quartz aurifère. Ces travaux étaient éboulés en 1911.

Pour le graphite, il est en paillettes et contenu dans une couche khondalitique de 3 à 4 mètres d'épaisseur, de direction N30/45°W. Cette bande graphiteuse se trouve au toit des migmatites de l'Angavo et au mur des micaschistes aurifères de Tongarivo, à l'Est de l'ancien chantier aurifère. Aucune exploitation n'a été entreprise car il n'était pas rentable économiquement.

Actuellement, l'Holcim ainsi qu'un ressortissant étranger indien sont chacun détenteur de permis minier dans la Commune d'Ambohidranandriana. L'Holcim est propriétaire d'un permis d'exploitation d'oxyde de fer tandis que celui de l'étranger est un permis de recherche d'or. Cependant, des activités illicites d'exploitations artisanales des veines de quartz aurifères par les paysans locaux s'observent sur les périmètres miniers. Des puits et galeries (trous de rat) en direction de ces veines aurifères sont creusés ici et là et peuvent atteindre jusqu'à 10 mètres de profondeur. Une venue d'eau dans les puits, due au fait que le niveau hydrostatique est atteint, entraîne l'abandon des puits.

I.2. CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Pour bien mener notre étude, il est nécessaire de voir au préalable le contexte géologique général auquel appartient notre zone d'étude, c'est pourquoi des rappels sur la géologie de Madagascar et celle de la région Vakinankaratra seront présentés dans les paragraphes qui suivent. Nous nous focaliserons plus sur le socle cristallin de Madagascar, en particulier sur le domaine d'Antananarivo car notre zone d'étude s'y trouve.

I.2.1. Rappel sur la géologie de Madagascar

A première vue, la carte géologique de Madagascar est simple. Elle est constituée par trois entités distinctes :

- Le « socle cristallin précambrien » qui forme presque toute la partie orientale et occupe le 2/3 de l'île, d'âge supérieure à 550 Ma d'où son appellation ;
- la « couverture sédimentaire phanérozoïque » reposant en discordance sur le socle cristallin et très développée sur la zone côtière occidentale de Madagascar ;
- les formations volcaniques qui sont disséminées dans divers endroits de l'île.

Il y a également des activités magmatiques diverses inférieures à 550 Ma.

I.2.1.1. Le socle cristallin précambrien de Madagascar [20]

Nombreux sont les travaux effectués sur le Précambrien malgache notamment ceux de Bésairie (1964 et 1973), Hottin et Vachette (1976), Windley et al. (1994), Rakotomanana (1996), Collins et al. (2000), Collins et al. (2002), PGRM (2008) et PGRM (2012). Dans ce mémoire, nous allons retenir les derniers concepts du PGRM qui établissent que le socle Précambrien, composé d'une grande variété de lithologies d'âge Archéen à fini-Protérozoïque (~3.2 Ga à 530 Ma) est divisé en six domaines (figure 3) à savoir : Antongil-Masora, Antananarivo, Ikalamavony, Androyen-Anosyen, Bemarivo et Vohibory.

Trois suites magmatiques singulières recoupent ces domaines. Il s'agit des suites de Dabolava (~1 Ga), Imorona-Itsindro (820 - 760Ma) et Ambalavao-Kiangara-Maevarano (570 - 520Ma).

Le Domaine d'Antananarivo

Le Domaine d'Antananarivo, qui correspond aux hauts plateaux du centre de Madagascar, est une vaste étendue composée d'orthogneiss et de paragneiss d'âge Néoarchéen en faciès schiste vert à granulitique. Les gneiss du Néoarchéen sont divisés en unités supracrustales, le Groupe de Vondrozo au sud et le Groupe de Sofia au nord, et en orthogneiss regroupés au sein de la Suite de Betsiboka qui présente une composition variée allant de granite-monzonite au tonalite-granodiorite. En plus de ces unités, le domaine comprend trois grandes ceintures synformes de schistes et de gneiss basiques d'âge Néoarchéen à Paléoprotérozoïque (2,70-2,48 Ga) regroupées au sein du Complexe de Tsaratanana. Elles sont représentées, d'ouest en est, par les ceintures de Bekodoka - Maevatanana, d'Andriamena et de Beforona.

A la base des hauts plateaux du centre de Madagascar se trouve la Série Schisto-Quartzo-Calcaire (Besairie, 1970), appelée encore Groupe d'Itremo et est caractérisé par une

séquence de roches sédimentaires de plateforme, pas ou peu métamorphiques (faciès schiste vert). Composées de quartzites, d'argilites, de siltites et de marbres, ces roches sont supposées s'être déposées au Paléoprotérozoïque (1800 à 1500 Ma).

Le domaine d'Antananarivo est aussi le substratum de deux séquences de roches métasédimentaires majeures, d'âge de dépôt Néoprotérozoïque, qui affleurent dans d'étroites ceintures orientées N-S : le Groupe d'Ambatolampy et le Groupe de Manampotsy.

Les roches métasédimentaires du Protérozoïque et leur socle Néoarchéen sont recoupées par deux générations de roches plutoniques : la Suite d'Imorona-Itsindro (820 - 740 Ma) qui consiste en un assemblage bimodal de gabbros et de syéno-granites ; et la suite d'Ambalavao - Kiangara - Maevarano (540 - 520 Ma) qui comprend des granitoïdes syn- à tardi-tectoniques (gabbro-diorites puis syénogranites) de type « stratoïdes ».

I.2.1.2. La couverture sédimentaire phanérozoïque

La couverture sédimentaire d'âge phanérozoïque de Madagascar occupe le tiers restant de l'île, développée surtout dans la partie occidentale et moins importante dans la partie orientale. Elle est constituée par la succession de couches subhorizontales, non plissées, très faillées, adossées en discordance au substratum cristallin. Elle est divisée stratigraphiquement en deux (02) grands groupes : la formation d'origine continentale appelée Karroo (Carbonifère au Jurassique Moyen) et la formation d'origine surtout marine dite Post Karroo (Jurassique au Quaternaire).

Ces formations sédimentaires sont déposées dans 3 bassins qui sont dans l'ordre décroissant d'importance en superficie : le Bassin de Morondava au Sud-Ouest, le Bassin de Majunga au Nord-Ouest et le Bassin d'Ambilobe dans l'extrême Nord de l'île.

Outre ces trois gros bassins occidentaux, il y a aussi un bassin littoral oriental étroit parallèle à la côte ainsi que des petits bassins internes (Alaotra-Ankay, Antanifotsy, Antsirabe et Sambaina Vinaninkarena).

I.2.1.3. Les formations volcaniques [14]

On peut distinguer deux grandes phases volcaniques principales à Madagascar, l'une crétacée, l'autre plio-quaternaire. Le volcanisme du Crétacé s'est manifesté suite à la séparation de Madagascar au Gondwana. Il est essentiellement formé par des épanchements volcaniques fissuraux à dominance basaltique, très étendus et abondants sur toute la périphérie de l'île et dans une partie du Centre Nord des Hauts plateaux. Il est bien conservé dans les bassins sédimentaires de l'Ouest et dans le massif de l'Androy. Trois complexes volcaniques dont le massif de l'Ankaratra, de Tsaratanàna et la montagne d'Ambre marquent

par contre le volcanisme plio-quaternaire qui est moins dominant que celui du Crétacé. Ils se sont mis en place suite au soulèvement, bombement et fracturation des Hauts plateaux au milieu et à la fin du Tertiaire suivant une direction subméridienne.

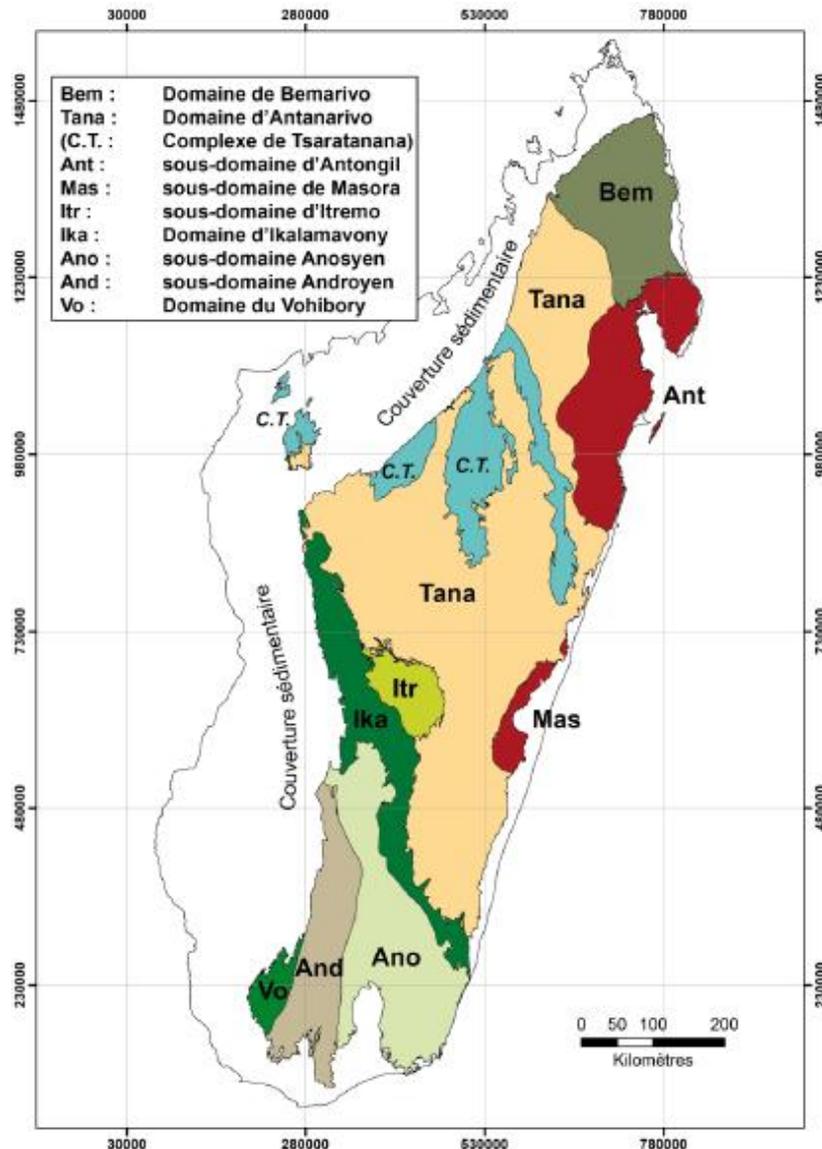


Figure 3 : Les domaines et sous-domaines géologiques du Précambrien Malgache (PGRM 2012)

I.2.2. Géologie de la région de Vakinankaratra

La Région du Vakinankaratra, à laquelle appartient la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, a été connue pour sa géologie très spécifique qui est liée avec l'histoire géologique de Madagascar. Elle fait partie géologiquement du domaine d'Antananarivo. Sa géologie est constituée par trois ensembles : le socle précambrien, les formations volcaniques et les sédiments lacustres.

I.2.2.1. Le socle cristallin précambrien [12] [15]

Une partie du socle cristallin précambrien de Vakinankaratra est formé par le complexe de roches cristallophylliennes ou paragneissiques, marqué par des micaschistes, des migmatites schisteuses et gneiss renfermant du graphite ainsi que des bancs de quartzites. Les migmatites schisteuses passent progressivement sur le terrain à des migmatites granitoïdes dans lesquelles la proportion quartzo-feldspathique prend de plus en plus d'importance.

On y rencontre aussi des granites à structure résiduelle. Ils sont localisés surtout au sein des migmatites granitoïdes sans que leur position soit bien définie.

Des gabbros anciens aux caractères très constants, qu'ils soient en enclave dans les migmatites ou en massifs dans les micaschistes sont présents. Il s'agit en réalité d'orthoamphibolites et d'orthopyroxénites.

Enfin, la série Schisto-Quartzo-Calcaire dolomitique (groupe de l'Itremo) affleure au Sud de la région. La discordance n'a pas été observée. Au sommet, on a des quartzites à muscovite, des talcschistes, des micaschistes à muscovite, puis des micaschistes à biotite, des gneiss à pyroxènes, des migmatites schisteuses.

I.2.2.2. Les formations volcaniques [14]

La Région du Vakinankaratra est célèbre pour son volcanisme donnant les massifs de l'Ankaratra. Ce volcanisme intense a commencé il y a 7 millions d'années. Des réajustements tectoniques ont eu lieu au Pliocène qui se sont traduits par des effondrements le long de lignes de fractures antérieures donnant la faille du Betampona et la faille du Mandray. Les formations volcaniques dans la Région de Vakinankaratra ont été émises en quatre phases d'éruption différentes. L'ordre de superposition et la situation respective des coulées et des appareils volcaniques, leur fraîcheur, permettent de définir leur ordre chronologique qui est synthétisé dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1 : Ordre chronologique d'émission des roches de l'Ankaratra (Bésairie, 1957)

	Age	Roches émises
Série supérieure	Quaternaire subactuelle	Basanitoïde, basanite
	Pléistocène	Ankaratrite, basalte
	Pliocène supérieure	Basalte, andésite
	Pliocène moyen	Trachyte, trachyphonolite
Série inférieure	Pliocène inférieure	Trachyte, andésite, rhyolite

I.2.2.3. Les sédiments lacustres [1] [12]

Des bassins sédimentaires de type lacustre, d'origine volcanique et tectonique sont également caractéristiques de la géologie de Vakinankaratra à savoir :

- le bassin de l'Onive rempli par des alluvions récentes et des formations lacustres ;
- le bassin d'Antanifotsy, avec un remplissage de sédiments néogènes dont des argiles, des schistes bitumineux et des lits de diatomites, intercalés par des produits basaltiques ;
- le bassin de Sambaina, formé par une grande plaine d'alluvions récentes et de sédiments analogues à ceux d'Antanifotsy ;
- le bassin d'Antsirabe, formé par des sédiments néogènes au quaternaire avec des conglomérats à galets trachytiques, des argiles et des cinérites.

La sédimentation de la région Vakinankaratra est d'âge pléistocène, elle a commencé par le dépôt des produits d'érosion du socle ancien, suivi du dépôt des produits d'altération et d'érosion des roches volcaniques.

I.2.2.4. Cadre tectonique [1] [12] [15]

Deux failles marquent le côté structural de la région de Vakinankaratra (figure 4) :

- la faille de la Manandona ou encore faille de Betampona, qui traverse en partie le Nord de notre zone d'étude. C'est une falaise gneissique, de direction presque Nord-Sud ;
- la faille de Mandray de direction N 07E.

Tous les deux sont dus à un soulèvement lié aux différentes phases d'épanchement volcanique qui ont débuté à la fin du Pliocène donnant ainsi un relief d'escarpement.

I.2.3. Géologie de la zone d'étude proprement dite [1]

La Commune Rurale d'Ambohidranandriana est cartographiée sur la feuille O49. Malheureusement, cette feuille n'a pas été mise à jour à travers les récents travaux du PGRM. La dernière version de carte géologique existante est la feuille n° NO49 de Besairie (1974). Celle-ci montre que les formations géologiques sont dominées par des migmatites (figure 5) de l'ancien système de graphite. Dans le coin Ouest de la zone d'étude s'édifient quelques cônes de basaltes à appareils très érodés. Des basaltes s'observent également à l'Est et au Sud-Est. La partie sud de la faille de Manandona traverse le Nord de la zone, très marquée à l'affleurement par l'escarpement. Sur le compartiment affaissé de l'Ouest se sont déposés des sédiments lacustres tandis que le compartiment soulevé de l'Est est constitué par de la migmatite. Quelques couches d'alluvions recouvrent des formations de la partie orientale et centrale. Des pitons volcaniques sont recensés dans l'Ouest de la zone d'étude.

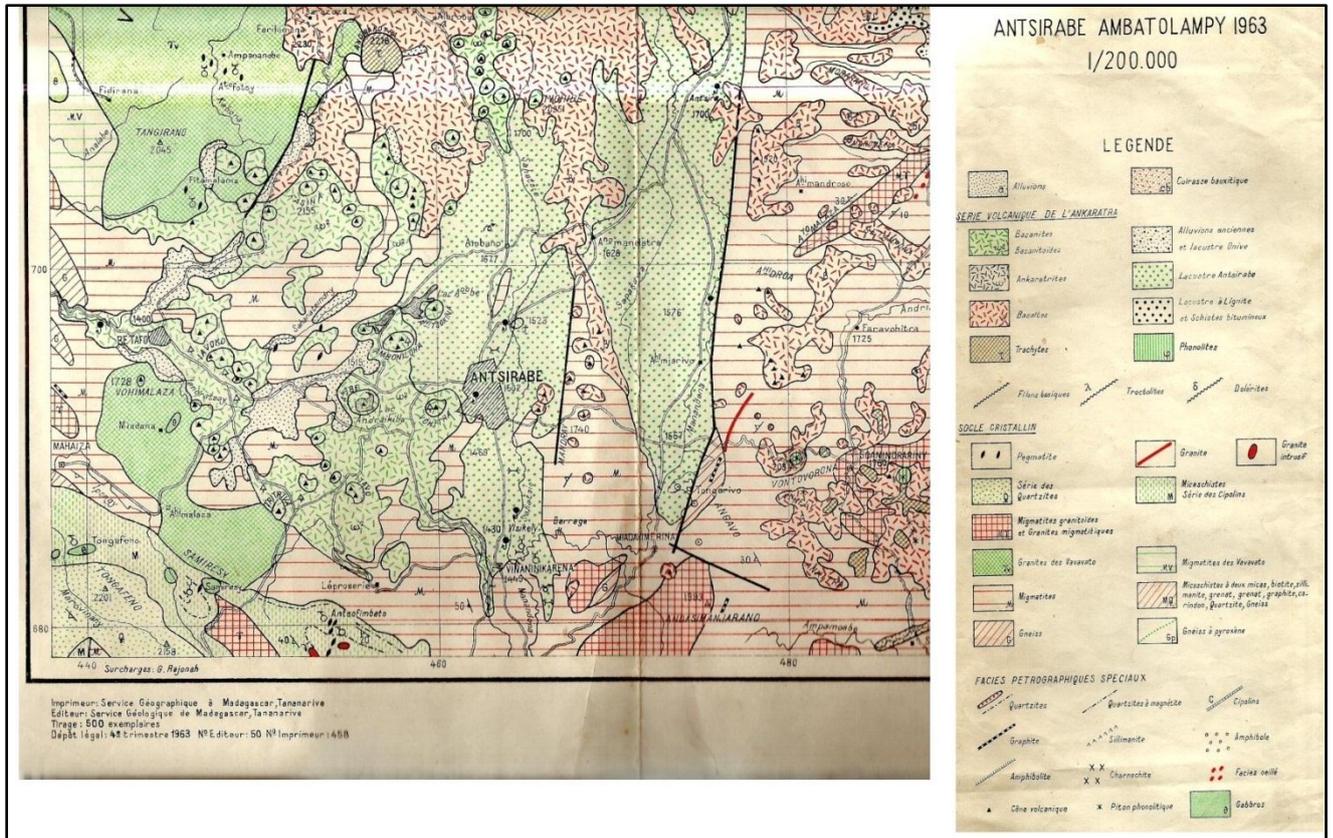


Figure 4 : Extrait de la carte géologique feuille Antsirabe-Ambatolampy 1963 au 1/200 000 (partie Sud-Est) montrant les failles de Mandray et de Manandona, caractéristiques de l'aspect structural de Vakinankaratra

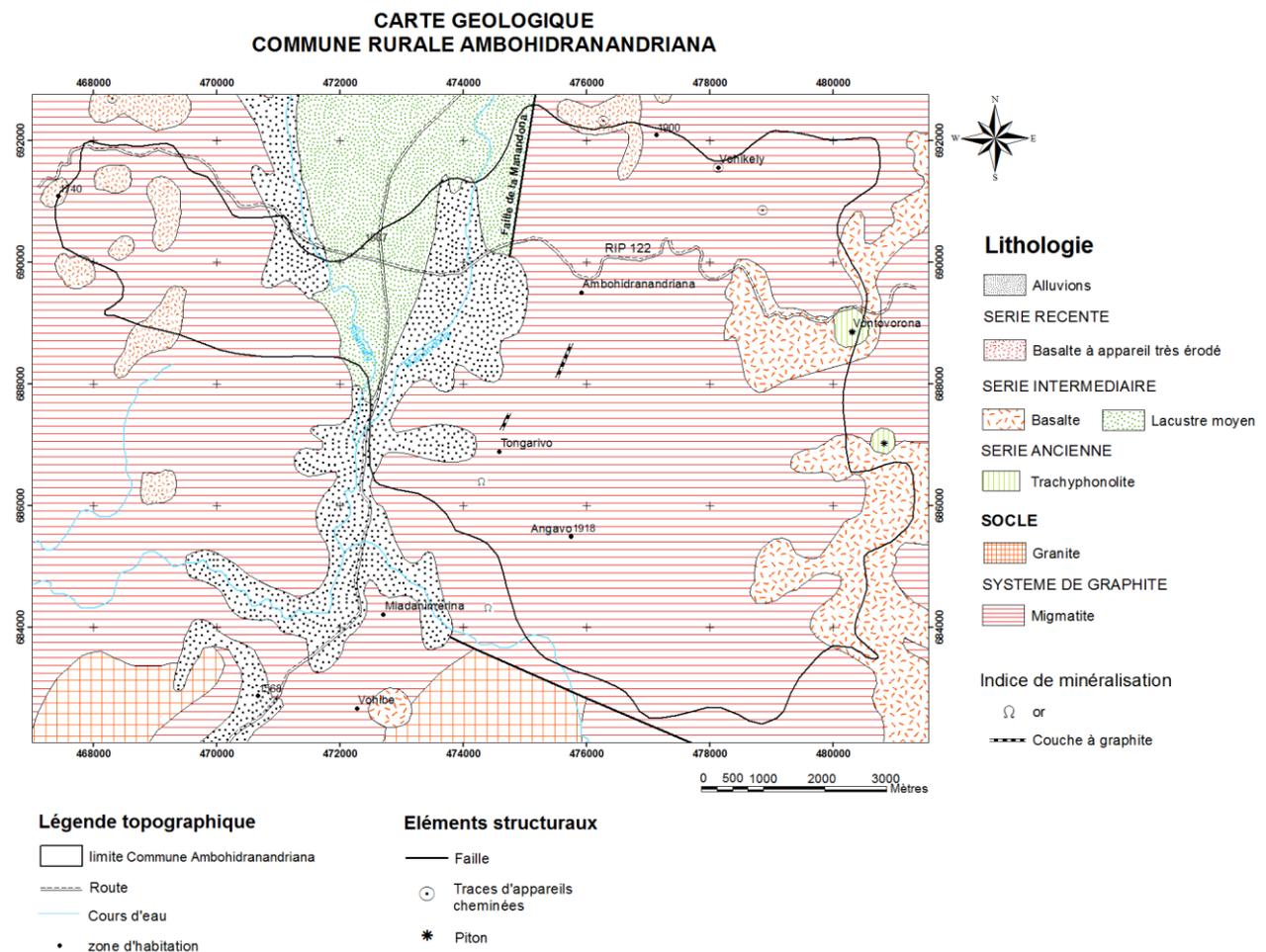


Figure 5 : carte géologique de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, extrait de la feuille NO 49 (Besairie, 1974) numérisé par l'auteur

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE FER ET L'OR

Le fer et l'or sont les substances minérales qui nous intéressent dans cette étude. Ainsi, quelques généralités sur les caractéristiques physiques, chimiques et géologiques de ceux-ci sont présentées dans ce second chapitre.

II.1. LE FER

II.1.1. Description [9] [27] [26]

Le nom du fer vient du latin « ferrum ». Les plus lointaines découvertes du fer remontent à environ 4000 ans avant le début du calendrier chrétien. Cet élément blanc argenté avec des reflets gris est le métal le plus courant dans la vie quotidienne sous forme pure ou d'alliages. En effet, le minerai de fer est la matière première de la fonte de première fusion, qui est elle-même la matière première principale de l'acier. Dans la croûte terrestre, le fer est le 4^{ème} élément le plus abondant (avec un Clarke de 5% soit 50 000g/t) après l'oxygène, le silicium et l'aluminium.

II.1.2. Les propriétés du fer [9] [27] [26]

Les propriétés physiques et chimiques du fer sont résumées dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2 : Les propriétés physiques et chimiques du fer

PROPRIETES PHYSIQUES	Dureté	4 à 5
	Densité	7,86
	Température de fusion	1538 °C
	Température d'ébullition	2750 °C
	Comportement à froid	mou, malléable et ductile
	Comportement à chaud	Plastique
	Magnétisme	- magnétisable aux températures ordinaires, - l'est difficilement lorsqu'il est chauffé
	Propriété électrique	conducteur électrique moyen
	Solubilité	soluble dans la plupart des acides dilués
PROPRIETES CHIMIQUES	Réactivité chimique	- Très réactif surtout lorsqu'il est en poudre - s'associe facilement aux halogènes (fluor, chlore, brome, iode et astate), au phosphore, au carbone et au silicium
	Affinité	- forte affinité pour le soufre - tendance oxyphile, d'où une minéralogie variée

Le fer possède deux valences : Fe^{2+} (ion ferreux) et Fe^{3+} (ion ferrique) ; d'où une dualité de comportement dans la nature : soluble donc mobile et facilement transportable à l'état ferreux et faiblement soluble et donc peu mobile et sujet à de concentration sur place à l'état ferrique. Les concentrations économiques hydrothermales et supergènes sont génétiquement liées à cette dualité. Le fer, combiné à l'oxygène, s'oxyde, suivant les conditions en trois oxydes de fer :

- ✓ l'oxyde de fer (II) : FeO , appelé oxyde ferreux et wustite sous sa forme minérale ;
- ✓ l'oxyde de fer (II,III) : Fe_3O_4 ou $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, ou oxyde magnétique, et magnétite sous sa forme minérale ;
- ✓ oxyde de fer (III) : Fe_2O_3 , appelée aussi oxyde ferrique, hématite sous sa forme minérale.

II.1.3. Minerais de fer

Le fer est contenu généralement dans le minerai sous différentes formes minérales. La plus répandue est la forme oxydée mais les minerais carbonatés ou sulfurés ne sont pas non plus moins abondants. Quelques caractéristiques des principaux minerais de fer avec les teneurs en fer correspondantes sont présentées en annexe (Annexe I).

Teneur limite d'exploitabilité [6]

Bien que le fer soit l'un des éléments les plus abondants et les mieux répartis dans le monde, toute roche en contenant ne peut être utilisée. L'exploitabilité d'un gisement est fonction de sa localisation, son degré de concentration et le stade de développement des techniques d'extraction et de traitement. La teneur limite d'exploitabilité d'un gisement de minerai de fer est de 30%. Ainsi, par rapport à leur richesse en fer, les minerais sont classés en : minerais pauvres ($\text{Fe} \leq 30\%$), minerais moyens ($\text{Fe} = 30\%$ à 55%) et minerais riches ($\text{Fe} > 55\%$). Lorsque la teneur est supérieure à 55%, le minerai ne nécessite aucune valorisation à part son calibrage. Lorsqu'elle est inférieure à 55%, il doit être valorisé pour en permettre la commercialisation.

II.1.4. Les types de gisements de minerais de fer dans le monde

Les gisements de minerais de fer sont nombreux mais tous n'ont évidemment pas la même importance sur le plan économique. Dans cet ouvrage, nous n'allons voir que ceux qui correspondent aux minerais les plus fréquemment utilisés par la sidérurgie. Sur le plan géologique, la plupart des gisements de fer se sont formés dans un environnement très spécifique, pendant une période particulière de l'histoire de la Terre.

II.1.4.1. Les formations de fers rubanés ou BIF [3] [6] [17]

Les formations de fers rubanés ou BIF (Banded Iron Formation) est un terme qui s'applique à toute roche qui présente une alternance (à différentes échelles) de lits sombres riches en fer et de lits clairs riches en quartz comme le montre la figure. Ces formations fournissent plus de 80% des ressources mondiales en minerai de fer.



Sur la base des minéraux ferrières présents, quatre faciès peuvent être distingués : oxydé (hématite-magnétite), carbonaté (sidérite), silicaté (greenalite) ou sulfuré (pyrite). Le contenu en fer de ces gîtes est typiquement de 20 à 35% mais peut dépasser largement ces valeurs. Les gisements de fer issus des BIF de la fosse du Labrador-Quebec au Canada ont par exemple une teneur en fer de 32% tandis que celle de la mine de Carajas au Brésil est en moyenne de 60 à 66% Fe.

L'origine sédimentaire des BIF par précipitation chimique dans l'eau de mer est généralement admise. Ainsi, les plus grands gisements de fer au monde issus des BIF se trouvent dans les séquences sédimentaires recouvrant les cratons archéens (Brésil, Australie, Amérique du Nord, Vénézuéla, Scandinavie, Russie, Ukraine, Inde, Afrique du Sud et Canada) et portent divers noms consacrés par les usages locaux tels que : itabirite, taconite, banded hematite quartzite, iron formation, jaspillite,...

Selon l'âge et l'environnement de dépôt, les BIF ont été divisés en trois classes [3] [28] :

- **Le type Algoma** : est toujours associé aux ceintures de roches vertes de l'Archéen. Il s'est formé dans un environnement distal aux cratons mais à proximité des arcs volcaniques. Les gisements de ce type sont les plus anciens avec un âge supérieur à 2,7 Ga et sont les plus nombreux. Ils sont dominés par des carbonates et des sulfures de fer.
- **Le type Lac supérieur** : est associé au talus continental des cratons, c'est-à-dire situés à la marge des cratons. Les gisements de ce type sont peu nombreux. Ils se sont déposés inégalement dans le temps du Néoarchéen au Paléoproterozoïque, soit principalement entre 2,7 et 1,8 Ga. Ils sont surtout à faciès oxydé et formés par l'envahissement des eaux sur le continent.
- **Le type Rapitan** : se dépose aussi sur le talus continental des cratons mais les conditions de formation sont différentes du type précédent. Ils sont rares et liés aux glaciations de la fin du Précambrien (1 à 0,5 Ga).

Certains dépôts ont été soumis à un métamorphisme plus ou moins intense ce qui a favorisé leur évolution ultérieure et la formation des minerais riches. D'autres n'atteignent cependant le stade économique que grâce à l'altération météorique permettant la concentration. Tel est le cas des itabirites de Brésil, qui constituent les plus grosses réserves mondiales.

II.1.4.2. Les minerais oolithiques [6] [17] [22]

Les minerais de fer oolithiques ou minettes sont très répandus mais pratiquement plus exploités (abandonnés suite à la découverte de gisements plus riches que sont les BIF). Leur nom exprime leur texture oolithique : grains ovoïdes concrétionnés formés de couches concentriques généralement constitués d'oxydes de fer hydratés. Le tout se baigne dans un ciment argileux ou limoniteux voire calcareux. Sur le plan minéralogique, ces minerais sont caractérisés par une grande variété de constituants : limonite, hématite, oligiste, chlorite, magnétite, sidérose, pyrite, quartz et calcite dont les proportions peuvent varier d'un gisement à l'autre mais aussi à l'intérieur d'un même gisement.

Ils se sont formés pendant les ères primaire et secondaire. Il s'agit de périodes caractérisées toutes deux par un haut niveau marin, de larges zones pénéplanées et un climat chaud et humide, responsable d'une importante altération chimique. Ces gisements, également sédimentaires, sont donc d'origine marine. Un exemple le plus connu est celui de Lorraine ou « Minette de Lorraine », qui était le principal gisement de minerai de fer français exploité avant 1990. On rencontre aussi ce type de gisement en Cleveland (Angleterre), à Assouan (Égypte), au Lung yen (Chine), en Normandie, à Anjou (France)...

II.1.4.3. Les minerais de ségrégation magmatique [6] [22]

D'importants gisements de magnétite (quelque fois avec des platinoïdes) différenciés dans des magmas basiques ou neutres sont connus. Le nom de ségrégation est admis à la minéralisation par le fait qu'elle dérivait du même magma que les porphyres dont elle s'était différenciée en profondeur.

D'une façon générale, dans les gabbros à olivine et les roches de compositions voisines, les minerais sont riches en titane. On peut citer les gisements de Taberg (Suède), du Lac Allard (Canada), du Lac Sandford (USA). Par contre, dans les laves acides, ils sont à peu près dépourvus de titane mais souvent apatiteux. Leur teneur en fer est ordinairement très élevée et atteint en moyenne 60%, avec 0,8 à 2% de phosphore. Ils constituent parfois des masses considérables comme à Kiirunavaara (Suède). Ils se présentent en général en lentilles plates ou veines comme à Cerro de Mercado (Mexique), Iron Mountain (USA).

II.1.4.4. Les gisements pyrométasomatiques

Les gisements pyrométasomatiques sont caractérisés par la présence d'une formation particulière très colorée et riche en espèces minérales : les skarns. Ils se développent par métamorphisme de contact ou régional intense entre une roche carbonatée et une roche intrusive. Les minerais correspondants sont à magnétite et à oligiste. Ils peuvent être pauvres ou riches en manganèse et contiennent souvent des éléments indésirables : phosphore, cuivre... La minéralisation peut se présenter en amas massifs, parfois aplatis. Les gisements de l'Oural, de Marcona au Pérou, de Rouina-Anini et Aïn Sedma en Algérie, aussi de nombreux gisements chinois sont rattachés à ce type.

II.1.4.5. Les gisements de substitution [6] [22]

Les gisements de substitution se sont formés par circulation d'eaux hydrothermales de haute température chargées en fer, qui ont entraîné le remplacement de calcaire ou dolomie par la sidérose des formations calcaires. Celle-ci s'est ensuite transformée en hématite par altération au contact des eaux de surface. Le fluide hydrothermal est, souvent, mais pas uniquement, d'origine magmatique. Le gisement d'Ouenza (Algérie), principal fournisseur en minerai de fer de l'Algérie, appartient à ce type. A Bilbao (Espagne), la sidérose qui constitue en profondeur le remplissage de nombreux amas produits par le métasomatisme dans les calcaires est bien particulièrement représentée.

II.1.4.6. Les gisements de concentration secondaire [3] [6]

Les latérites ferrugineuses se développent surtout sur les roches ultrabasiques et dans des régions équatoriales à climat tropical chaud et humide. La minéralisation s'obtient par enrichissement supergène : altération particulière par lessivage des roches cristallines avec départ de la silice et des bases. Du point de vue minéralogique, on a de la stilpnosidérite noire, de la limonite, de la goethite et très peu d'hématite. La teneur moyenne en Fe est de 40 à 48%, $\text{SiO}_2 < 1\%$ et un peu de TiO_2 . Morphologiquement, la partie supérieure de la latérite consiste en de graviers riches en oxydes de fer et en une cuirasse indurée, qui peuvent être non consolidés ou cimentés. Un exemple pour ce type est la cuirasse de Conakry.

Dans la même catégorie, il y a les placers qui sont des dépôts de minéraux lourds le long des rivages ou dans les rivières. Certains rivages présentent ainsi de grandes accumulations de minéraux ferrifères (magnétite plus ou moins riche en titane et généralement associée à de l'ilménite) mélangés à du sable et faciles à enrichir. Mais de tels gisements sont en général exploités comme source de minerai de titane. Le fer y est extrait en

tant que sous-produit. De tels gisements sont exploités à grande échelle en Nouvelle-Zélande, Californie (USA), et sur la Côte Ouest de l'Italie.

Il est utile de mentionner qu'avant 1970, l'exploitation des gisements d'oxyde de fer était exclusivement liée à l'industrie de la sidérurgie. Mais depuis 1975 selon Faure (2003) [11], le concept de gisements d'oxyde de fer polymétalliques est né suite à la découverte du mégagisement d'Olympic Dam (Australie). Le principal caractéristique de ces gisements est qu'ils renferment des contenus sub-économiques à économiques en Cu, U, Au, Ag, Co et Terres Rares. En effet, leur rentabilité était par la suite basée sur le contenu en ces éléments plutôt que sur le fer. On les appelle aujourd'hui gisement de type fer-oxydes ou IOCG (Iron-Oxide Copper Gold). Depuis, l'engouement pour la découverte de ces gisements n'a pas cessé de croître auprès des grands producteurs de cuivre et d'uranium, en raison de leur tonnage considérable. Après la découverte, nombreux sont les gisements connus qui ont été reclassés dans la catégorie des gisements de type IOCG comme le cas de Bayan Obo où la bastnaésite est un coproduit de la mine de fer et constitue le plus important gisement d'ETR au monde. Selon les études, les gisements se sont formés dans des environnements d'arc continental (Candelaria) à intracratonique (Olympic Dam) d'après Beaudoin (2006) [4], ils sont riches en magnétite et souvent associés au magmatisme felsique.

II.1.5. Les gisements de fer à Madagascar [17] [20]

Le fer est le principal élément entrant dans la composition de l'acier. Madagascar possède des potentialités, attirant de nombreux investisseurs. Mais la teneur en fer de la plupart des gisements reste faible avec un taux de 30%, rendant difficile l'exploitation comparée à celle des autres pays producteurs. Soalala constitue le plus grand gisement du pays avec une réserve de 360 Mt à 35% poids de Fe. Il est formé par trois gîtes principaux dont Kizombivavy, Kizombilahy et Malainolo. Les réserves à ce jour explorées appartiennent à la société chinoise WISCO.

Géologiquement, les gîtes de fer existant à Madagascar sont notamment liés aux quartzites à magnétite représentés par des BIF affectés par le métamorphisme. Le tableau 3 résume les caractéristiques des principaux gisements et gîtes de minerai de fer connus à Madagascar. A part ceux cités, quelques gisements de petite taille (entre 5 et 1 million de tonnes) tels que Mantasoa, Marorangoetra et Mahabe ainsi que de nombreux indices à prospecter sont recensés comme le montre la figure 6.

Tableau 3 : Caractéristiques des principaux gisements et gîtes de minerai de fer à Madagascar

Nom du gîte	Coordonnées (km)		Substances	Minéraux caractéristiques	Morphologie	Direction générale minéralisation	Roches encaissantes		Données économiques		Carte géologique 1/100000	Type (d'après notice explicative PGRM 2012)
	X	Y					Age	Nature	Tonnage métal (Mt)	Teneur (%)		
Solalala	250	1073	Fe	Magnétite Hématite	Banc	NS	Archéen	Quartzite	360	35	Bevary H-41	Fe-Algoma ou Fe-Superior (Cannon, 1986 a et b)
Betioky	194	226	Fe	Limonite Stilpnosidérite	Couche		Sénonien Néogène	Grès ferrugineux	{ 30 130	24 10 à 14	Ejede F-60	Cuirasses ferrugineuses
Bekisopa	337,5	490	Fe	Magnétite	Banc	N 330 à NS	Protérozoïque	Gneiss	{ 10 130	60 10 à 14	Bekisopa J-54	Métasomatique skarnoïde (Fournié, 1963)
Fasintsara	534	602	Fe	Magnétite	Banc	N 25 / 60°W	Archéen	Quartzite	100	35	Ampasinampo Q-51	Fe-Superior (Cannon, 1986a et b)
Fenoarivo Mananjary	578,7	562,7	Fe, Au	Magnétite Hématite Or	Banc	N 135 / 40 E	Catarchéen	Quartzite	94,5	37,7	Vohilava R-52	Itabirite (BIF)
Ambohimahavy Ampiadiamby	540,7	728,5	Fe	Magnétite	Banc	NW-SE à N-S	Archéen	Quartzite	30	60	Ambohimadana Q-48	Fe-Superior (Cannon, 1986a et b)
Ambatovy Analamay	597	806	Fe, Ni, Co	Limonite Stilpnosidérite	Cuirasses	Horizontale	Crétacé	Péridotite	30	46	Lakato S-47	Cuirasses ferrugineuses sur latérites nickelifères

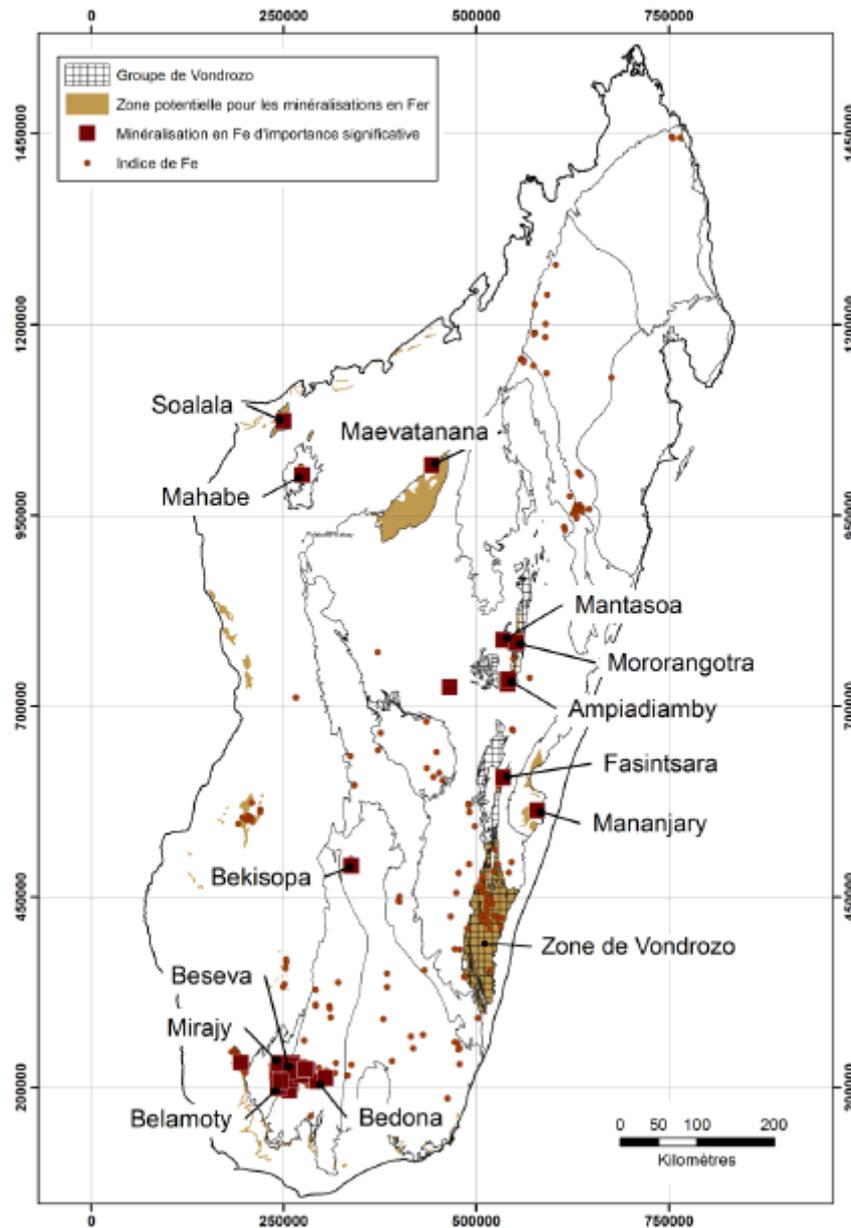


Figure 6 : Carte des indices de fer et des zones favorables à Madagascar (PGRM, 2012)

II.2. L'OR

II.2.1. Description

L'or, un métal de transition, est un élément chimique de symbole Au, de numéro atomique 79. C'est un métal jaune brillant avec un trait jaune métallique lorsqu'il est pur. Cependant, l'or naturel contient souvent des impuretés (Ag, Cu, Fe, Bi, Pt, Pd, Rh, Hg...) lui conférant ainsi différentes variétés de couleur. L'électrum (alliage d'or et d'argent), par exemple, est d'un jaune pâle, tandis que les variétés riches en cuivre sont un peu rougeâtres. Ce métal précieux est très recherché et prisé grâce à ses caractéristiques exceptionnelles. Dans la

nature, il peut se présenter à l'état natif sous forme de pépites qui peuvent avoir été réduites en poudre ou paillettes, par érosion mécanique. La teneur moyenne de l'or dans la lithosphère ou Clarke est de 0,05ppm (=0,05g/t).



Figure 7 : Or dans une veine de quartz



Figure 8 : Paillettes d'or



Figure 9 : Or natif, Venezuela

II.2.2. Les propriétés de l'or [2] [9] [27]

II.2.2.1. Propriétés physiques

L'or est reconnu pour sa densité élevée qui est de 19,29 à l'état pur mais la présence des impuretés pourrait diminuer cette valeur jusqu'à 14 voire moins. Il a par contre une faible dureté : entre 2,5 et 3 sur l'échelle de Mohs. Le métal a une température de fusion élevée d'environ 1064,18°C et une température de vaporisation de 3129 K. Sa température d'ébullition est de 2856°C.

L'or est le plus malléable et le plus ductile de tous les métaux. L'or pur se déforme facilement à froid par martelage ou par étirement de telle sorte qu'1g d'or peut fournir un fil de 2 km de longueur. Ses atomes sont empilés selon une structure cubique à faces centrées permettant sa déformation plastique qui se fait par glissement des plans denses sur les autres. Mais quand l'or contient des impuretés, en particulier du plomb et de l'arsenic, sa malléabilité et sa ductilité diminuent notablement. En effet en joaillerie, l'or est souvent allié avec d'autres métaux (Ag, Cu, Pd...) pour augmenter sa dureté et pour varier sa couleur. Par contre, un réseau cristallin d'atomes d'or chauffé à des températures dépassant un milliard de degrés ne fond pas mais au contraire devient plus résistant.

L'or est aussi le métal le plus électronégatif avec une conductivité électrique de $42,5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, une conductivité thermique de 317 W/m.K et une résistivité de $2,04 \cdot 10^{-6} \text{ ohm.cm}$ à 0°C. C'est un excellent conducteur thermique et électrique, le troisième métal le plus conducteur après l'argent et le cuivre, ce qui permet son utilisation dans la réalisation de certains composants électroniques, tels les microprocesseurs.

II.2.2.2. Propriétés chimiques

L'or est très apprécié par le fait qu'il ne s'oxyde ni à l'air ni dans l'eau à toute température, donc quasiment inaltérable. Il résiste à l'action de nombreux produits chimiques, notamment les acides. Cependant, il peut être attaqué par le chlore et le brome et est soluble dans le cyanure et « l'eau régale » (combinaison d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique). Cette propriété a été en effet exploitée pour purifier les minerais à l'extraction : les minerais de bonne qualité vont se séparer de leur or sous l'effet d'une solution de cyanure de sodium (cyanure).

D'autre part, l'or est un élément chimique sidérophile (affinité avec le fer). Dans les domaines d'immiscibilité de phases fondues de fer natif et de fer sulfuré, l'or présente une très forte affinité au fer natif. Sa paragenèse est constituée généralement de gangue de quartz et de sulfures (chalcopyrite CuFeS_2 , pyrite FeS_2).

II.2.3. Les minéraux aurifères [19]

L'or se combine à d'autres éléments chimiques formant divers minéraux aurifères. Les caractéristiques des principaux minéraux aurifères sont présentées au tableau de l'annexe II.

II.2.4. Géologie de l'or dans le monde

II.2.4.1. Métallogénie [19] [16]

Il a toujours été considéré que les gisements d'or sont généralement de nature hydrothermale et que l'or est retrouvé dans les trois types d'hydrothermalisme : hypo, méso et épithermal. Il semble que l'or soit en rapport avec l'émanation de granites et de diorites qui se traduit par des filons hydrothermaux. Toutefois, il faut noter que l'or est souvent associé aux amas pyriteux du magmatisme profond dont les roches mafiques et les roches ultramafiques telles que les dolérites et les autres roches. Actuellement, il est bien établi que le magmatisme des domaines profonds est la source magmatique de l'or et ceci, en raison de son caractère sidérophile. Si l'or n'est pas contenu notablement dans les granites il se trouve régulièrement à faible teneur dans les roches basiques - ultrabasiques. Un événement de granitisation remobiliserait, avec la silice, cet or en infime quantité des formations basiques -ultrabasiques pour le reconcentrer par précipitation à l'occasion des opportunités de piégeage. D'après Harcouët (2005), voici, représentés dans le tableau 4, les paramètres thermodynamiques qui conduisent à la précipitation de l'or mésothermal.

Tableau 4 : Paramètres de précipitation de l'or mésothermal (Source : Harcouet 2005)

Faciès	Température (°C)	Pression (kbar)
Schiste vert	180	1
Amphibolite inférieur	300 – 400	2 - 4
Granulite	700	5 - 6

II.2.4.2. Les types de gisements d'or dans le monde [3] [16] [19]

D'une manière générale, on distingue les gîtes primaires et les gîtes secondaires d'or.

a. Les gisements primaires de l'or

Les gisements d'or hydrothermaux

- Les gisements d'or épithermaux

En référence à la classification de Lindgren (1933), le terme épithermal est utilisé pour décrire les gisements associés au volcanisme ou volcano-sédimentaire. Les variations de la température, des pH et des états d'oxydo-réduction du fluide et du milieu conduisent à deux types de dépôts, appelés "de haute sulfatation" (épithermaux acides) ou "de basse sulfatation" (épithermaux neutres) selon qu'ils dérivent des fluides minéralisateurs contenant des espèces soufrés oxydés (SO_2 , SO_4^{2-} et HSO_4^-) ou réduites (H_2S , HS^-). Le premier type est formé communément à proximité des événements volcaniques, à partir des fluides qui dérivent directement du magma ; le deuxième est formé dans les parties les plus distales, à partir des mélanges des fluides magmatiques et météoriques.

Les gisements épithermaux se rencontrent dans les arcs volcano-plutoniques, les arcs insulaires et les arcs de cordillère associés aux zones de subduction. Ce sont des gisements très superficiels puisqu'ils se mettent en place entre 2 km de profondeur et la surface donc très sensibles à l'érosion.

- Les gisements d'or orogéniques

Anciennement appelés "gisements d'or mésothermaux", c'est la seconde catégorie la plus importante de gisements d'or après les épithermaux. Ils consistent en des veines de quartz seul ou associés avec des carbonates dans les failles des zones de cisaillement des terrains déformés et métamorphisés. Contrairement à la plupart des autres types de gisements, les gisements d'or orogéniques se forment tardivement dans l'évolution des environnements de marges convergentes, lors des événements orogéniques majeurs, syn- à post-pic métamorphique. Ces gisements n'ont pas d'association directe avec les magmas. On pense que les fluides à l'origine des minéralisations sont d'origine métamorphique émis par la

déshydratation des minéraux lorsque la température ou la pression augmente. Alors qu'ils pénètrent des roches métavolcaniques et métasédimentaires en traversant la croûte, les fluides métamorphiques lessivent l'or, transporté sous forme de complexes de chlorures ou de sulfures. Les structures tectoniques exercent un contrôle majeur sur les sites de formation de gisements en guidant le passage des fluides. Les réactions des fluides avec l'encaissant produisent des zones d'altérations caractéristiques.

- Les porphyres

Les porphyres sont des gisements reliés par des corps magmatiques intrusifs de composition felsique à intermédiaire. Ils se mettent en place à faible profondeur (1 à 5 km), à l'aplomb d'intrusions calco-alcalines liées aux zones de subduction, au niveau d'arcs insulaires ou de cordillères continentales. L'or est associé en principe avec la minéralisation de cuivre. Les porphyres à cuivre-or se trouvent surtout dans les arcs insulaires ou marges actives.

Les gisements d'or pegmatitiques et pneumatolytiques

Les gisements d'or pegmatitiques existent mais sont très rares. Par contre, seuls les pneumatolytes fémiqes donnent des gisements. Ceux-ci sont, soit purement aurifères, soit aurifères en même temps que cuprifères, plombo-argentifères, bismuthifères et même cobaltifères. En plus des minéraux propres aux pneumatolytes comme la tourmaline, la topaze, l'albitite, le quartz,..., il faut également noter la présence de sulfures et d'arséniures. Les roches encaissantes sont fréquemment biotitisées et albitisées. La forme des gisements est souvent lenticulaire.

Gîtes d'or stratoïdes dans des formations de fer

Ces gisements sont encaissés dans des formations de fer renfermant des filons de quartz ; la minéralisation aurifère est le plus souvent associée à des sulfures disséminés ou massifs à proximité des filons. Ils présentent des aspects propres à deux classes gîtologiques : les formations de fer hôtes et la minéralisation en or que celles-ci renferment. En raison de la nature exhalative inhérente des formations de fer, il est possible que l'enrichissement en or de certains gisements de cette catégorie soit attribuable à des processus antérieurs à la formation des filons.

Gîtes de sulfures massifs aurifères associés à des roches volcaniques

Les gîtes de sulfures exhalatifs stratiforme sont généralement constitués d'accumulation massive à semi-massive de minéraux sulfurés et sulfatés qui se sont formées

sur ou immédiatement sous le fond océanique. Dans le type qui nous intéresse, l'or est la substance principale. Ce type de gisement se forme au niveau des dorsales océaniques, des arcs et des rifts océaniques mais aussi dans les bassins d'arrière-arc, dans des séquences volcaniques et volcano-sédimentaires datant de l'Archéen à l'actuel ; à l'échelle régionale, les séquences hôtes comportent typiquement deux éléments contrastés : une composante mafique (basalte, andésite ou amphibolite) et une composante felsique sous forme de tufs et de brèches volcaniques. On entendra parler des ceintures de roches vertes dans certains cas.

b. Les gisements secondaires d'or

Ils résultent de l'altération météorique des gîtes primaires suivie d'une reconcentration de l'or. On distingue en effet : les éluvions, les colluvions et les alluvions. L'or dans les placers est presque pur : il s'agit habituellement d'un alliage comprenant 80 à 85% d'Au, le reste étant principalement de l'Ag. Là où les veines à l'origine des placers peuvent être localisées, on remarque que l'or des placers sont généralement plus pur que l'or des veines. La purification a lieu en partie par oxydation lorsque l'or est exposé à la surface car l'argent est plus soluble que l'or dans ces conditions.

II.2.5. L'or à Madagascar [7]

La première découverte de l'or sur notre île aurait été faite par Jean Laborde en 1845 mais c'est seulement à partir de 1883 que commencent les premières exploitations à Ampasary et fournit le premier kilogramme d'or, ensuite à Ambositra avec 5 kilogrammes, à Maevatanana vers 1885 avec 75 kilogrammes. Miarinavaratra a connu l'exploitation de l'or depuis l'ère coloniale mais la production n'a pas été publiée dans les ouvrages.

Sur le plan métallogénique, l'or est présent à Madagascar dans la plupart des zones du socle cristallin, tant dans les formations d'âge Archéen que Protérozoïque (figure 10). Les lithologies d'affinité basique sont particulièrement favorables aux concentrations aurifères où les minéralisations apparaissent soit dans des niveaux conformes, soit dans des veines sécantes à la fabrique régionale, ou encore sous forme disséminée. Les ceintures de roche vertes archéennes sont reconnues comme une source prolifique d'or primaire. L'or épithermal (vraie veine aurifère de Besairie) est présent dans des roches d'âge Phanérozoïque au nord de l'île, et pourrait également se trouver à proximité des centres volcaniques d'âge Cénozoïque. Il est caractérisé par des fractures sécantes remplies de quartz automorphe, de barytine et or, typique du gisement de Betsiaka district d'Andavakoera. Par contre, les minéralisations d'or orogénique sont localisées dans les veines de quartz concordantes avec la foliation des

schistes cristallins en épousant les plis préexistants. D'après les études faites par le BRGM (1985) à Madagascar, trois types de gîtes primaires d'or ont été mis en évidence.

- ***Gisements appartenant au domaine Archéen***

Ce sont les plus nombreux, la minéralisation se trouve dans un système de veines interstratifiées associées à :

- des séries de roches amphiboliques basiques : Maevatanàna, Andriamena, Alaotra, Ampasary ;
- des quartzites à magnétite : Maevatanàna, falaise Orientale de Sud d'Antananarivo et du Sud-est, plus accessoirement Andriamena et Beforona-Alaotra;
- des séries silico-alumineuses de type Ambatolampy-Andriba (quartzites, gneiss, migmatites, micaschistes alumineux et souvent graphiteux) : régions - types d'Ambatolampy et d'Andriba à l'Ouest d' Antananarivo, série de Sahantaha et de Vavatenina, plus accessoirement séries de Maha et de Vohilava-Ampasary et Sud-Est ;
- à ces trois types se surimpose un type lié aux intrusions granitoïdes tardives qui affectent localement les faciès énumérés ci-dessus, par remobilisation du stock aurifère, sous forme de filons pér batholitiques, de stockwerks et de minéralisation diffuses.

- ***Gisements primaires appartenant au domaine Protérozoïque***

Ces gisements sont souvent associés à des faciès de micaschistes ou aux quartzites de la série « schisto-quartzo-carbonatée » et transformés par un métamorphisme de contact intrusif. Ils apparaissent le plus souvent sous forme de dissémination de sulfures aurifères. Ce type est observé dans la région de Betsiriry (à l'Est de Miandrivazo) où les indices aurifères se regroupent dans la zone de passage entre les gneiss migmatitiques et la série épi-métamorphique SQC ; Il se rencontre également dans la région d'Itea où les indices s'alignent dans les formations plus ou moins silicifiées bordant le massif granitique intrusif d'Itea.

- ***Gisements primaires liés à la tectonique Permo-triasique***

Les gisements se présentent sous forme de filons hydrothermaux à remplissage quartzo-baritiques de fracture, avec de l'or natif et de l'or associé à des sulfures. Ce type de gisement ne se rencontre que sur la bordure socle-sédimentaire de l'extrémité Nord de Madagascar, c'est-à-dire à Andavakoera.

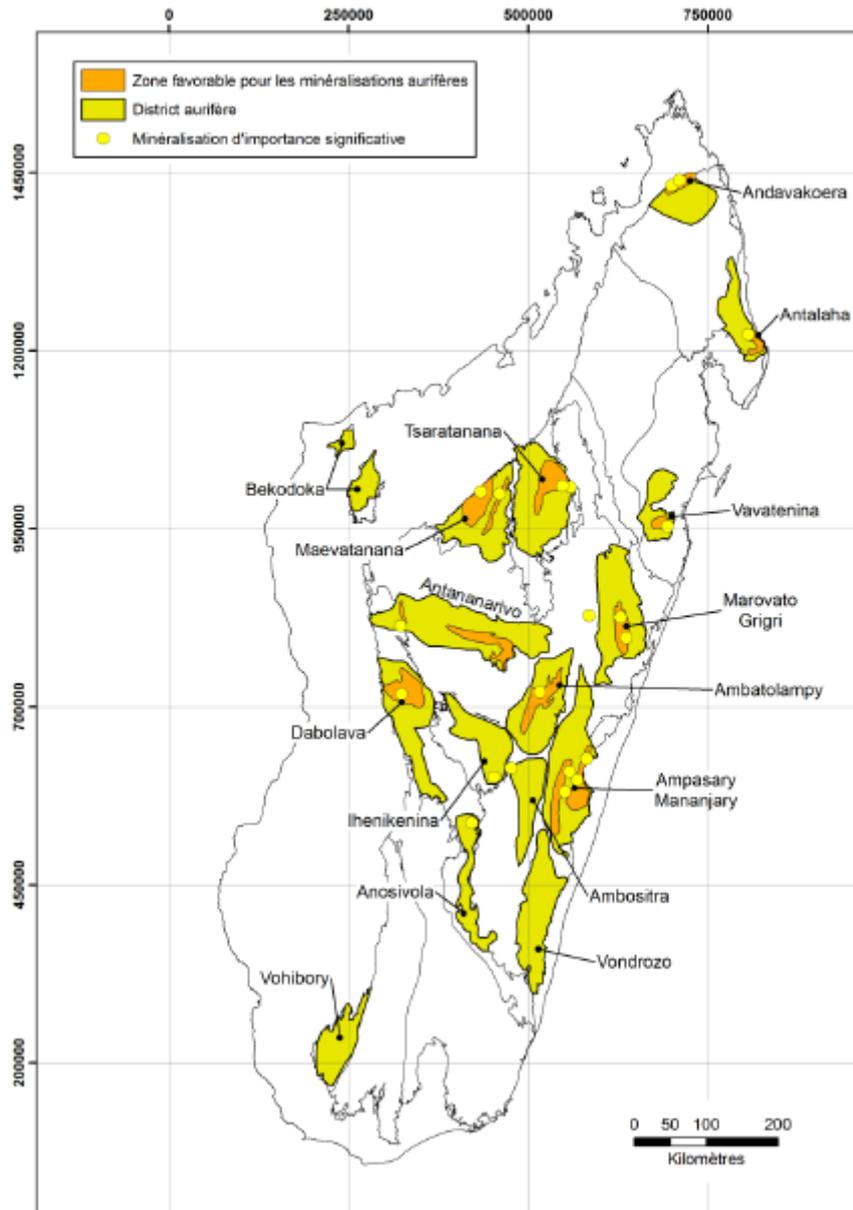


Figure 10 : Les principaux indices et zones aurifères à Madagascar (PGRM, 2012)

CONCLUSION PARTIELLE

D’après la notice explicative de la carte au millionième de Madagascar (PGRM 2012), on constate que nombreux auteurs associent la plupart des gisements de fer à Madagascar au type BIF. Pour l’or, les études ont définies que la majorité des gisements dans la partie du socle appartient au domaine Archéen dans un système de veines interstratifiées. Pour notre cas, l’interprétation des résultats des différentes méthodes mises en œuvre décrites dans la deuxième partie qui suit, à savoir les analyses géophysiques, chimiques et pétrographiques, permettra de définir à quelles types appartient les minéralisations en oxyde de fer et or de Tongarivo. La minéralisation aurifère y a été découverte et exploitée avant 1911 et le gisement est encore aujourd’hui en exploitation.

PARTIE II :

METHODOLOGIE

CHAPITRE 3 : METHODE DE TRAVAIL

III.1. ORGANIGRAMME

Les travaux d'étude se divisent en trois étapes : la partie avant la descente sur terrain, pendant le terrain et après le terrain. La démarche des travaux qu'on a effectués est résumée par l'organigramme suivant (figure 11).

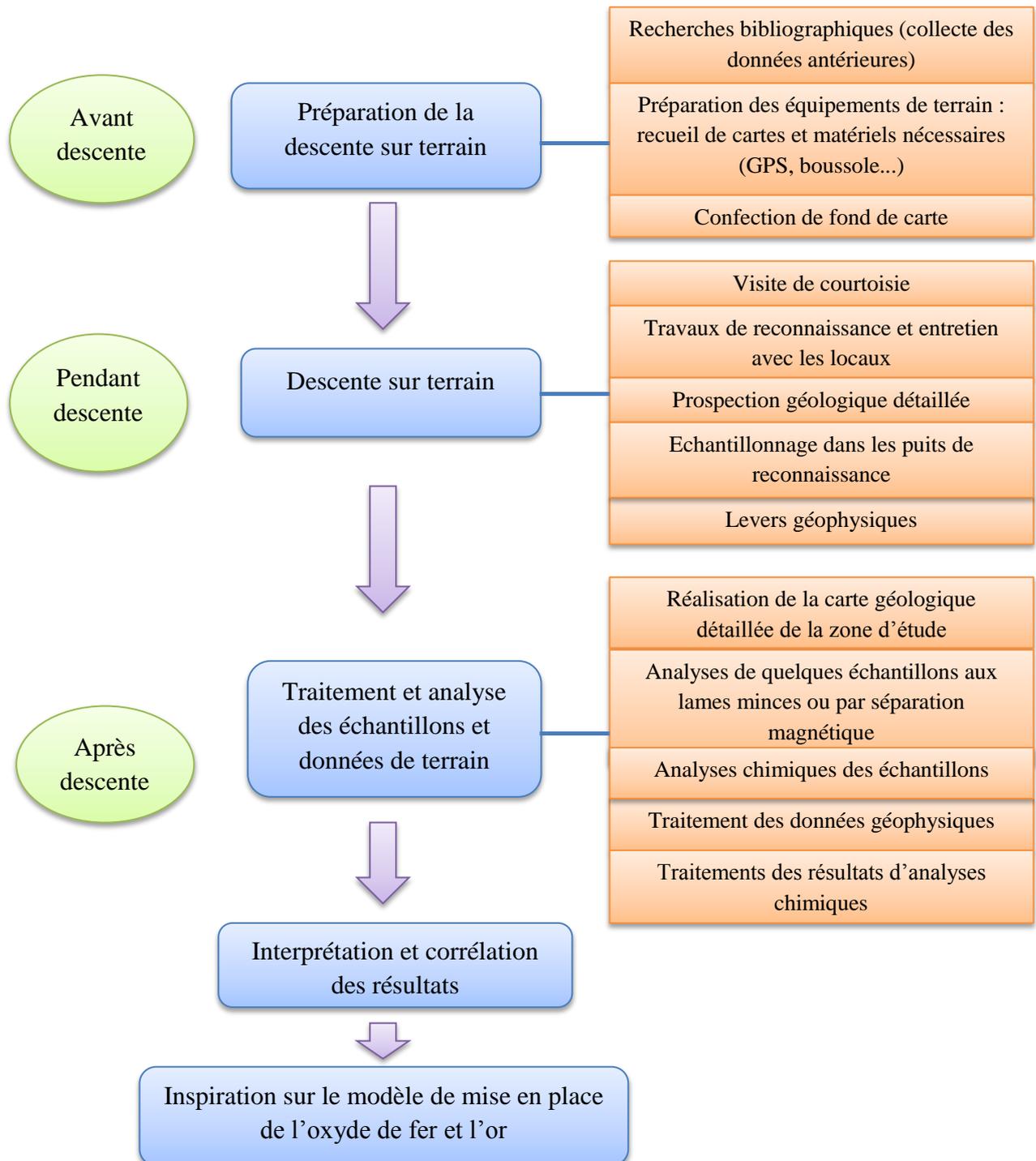


Figure 11 : organigramme de l'étude

III.2. LES DEMARCHES DES TRAVAUX

III.2.1. Les préparatifs

Cette partie avant la descente sur terrain consiste en la préparation de la descente dans le but de connaître au mieux les contextes géographiques et géologiques dans lesquels on va travailler, permettant ainsi d'avoir une idée de ce qui nous attend afin d'éviter toute surprise et garantir un meilleur déroulement des travaux. Ils comportent plusieurs tâches.

III.2.1.1. Travaux de documentation

La documentation est la première étape de l'étude. Elle consiste à rassembler toutes les informations qui concernent notre étude, c'est-à-dire à recueillir tous types de documents qui permettent de mener à bien le travail. On les récolte au sein de différents institutions, services, bureaux...et par collaboration avec des enseignants et professeurs. Pour notre cas, nous avons visité le centre de documentation du Service Géologique à Ampandrianomby, le BCMM Ampandrianomby, la bibliothèque Universitaire d'Antanarivo, la bibliothèque du PGRM Ampandrianomby et du Ministère des mines Ampandrianomby, différentes bibliothèques telles la bibliothèque du département Géologie à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, le CITE Ambatonakanga... D'autres informations ont été obtenues par webographie.

Les documents que nous avons rassemblés sont :

- des ouvrages qui apportent des informations sur la géologie du Vakinankaratra, d'Antsirabe et du site d'étude;
- des documents cartographiques : ils servent à localiser la zone géographiquement, topographiquement et géologiquement pour mieux la cerner. On a ainsi recueilli une carte topographique d'Antanifotsy feuille n° O49 au 1/100 000, une carte géologique d'Antsirabe-Antanifotsy feuille n° NO 49 au 1/100 000 de Besairie (1974) et une carte géologique d'Antsirabe feuille n° N49 au 1/100 000 (PGRM 2012) ;
- des ouvrages, textes, rapports et autres livres qui apprennent sur l'or et le fer, et leur métallogénie.

III.2.1.2. Préparation des équipements

Avoir à sa disposition tous les matériels nécessaires à la descente sur terrain est également un facteur essentiel au bon déroulement des travaux. Pour cela, nous avons rassemblé tous les équipements nécessaires qui comportent les matériels et les fonds de carte, cités en annexe III.

a. La confection des fonds de cartes

La carte établie après l'étude doit être à l'échelle de 1/30 000. Or, les cartes à notre disposition sont à l'échelle de 1/100 000. Il a fallu par conséquent agrandir et découper les cartes topographiques et géologiques disponibles puis les géoréférencer.

Un des fonds de cartes également important est l'image satellite par le fait qu'elle permet une vue réelle du terrain. On l'a obtenu sur Google Earth (figure 12).

FOND DE LA CARTE GEOLOGIQUE DE LA COMMUNE RURALE D'AMBOHIDRANANDRIANA

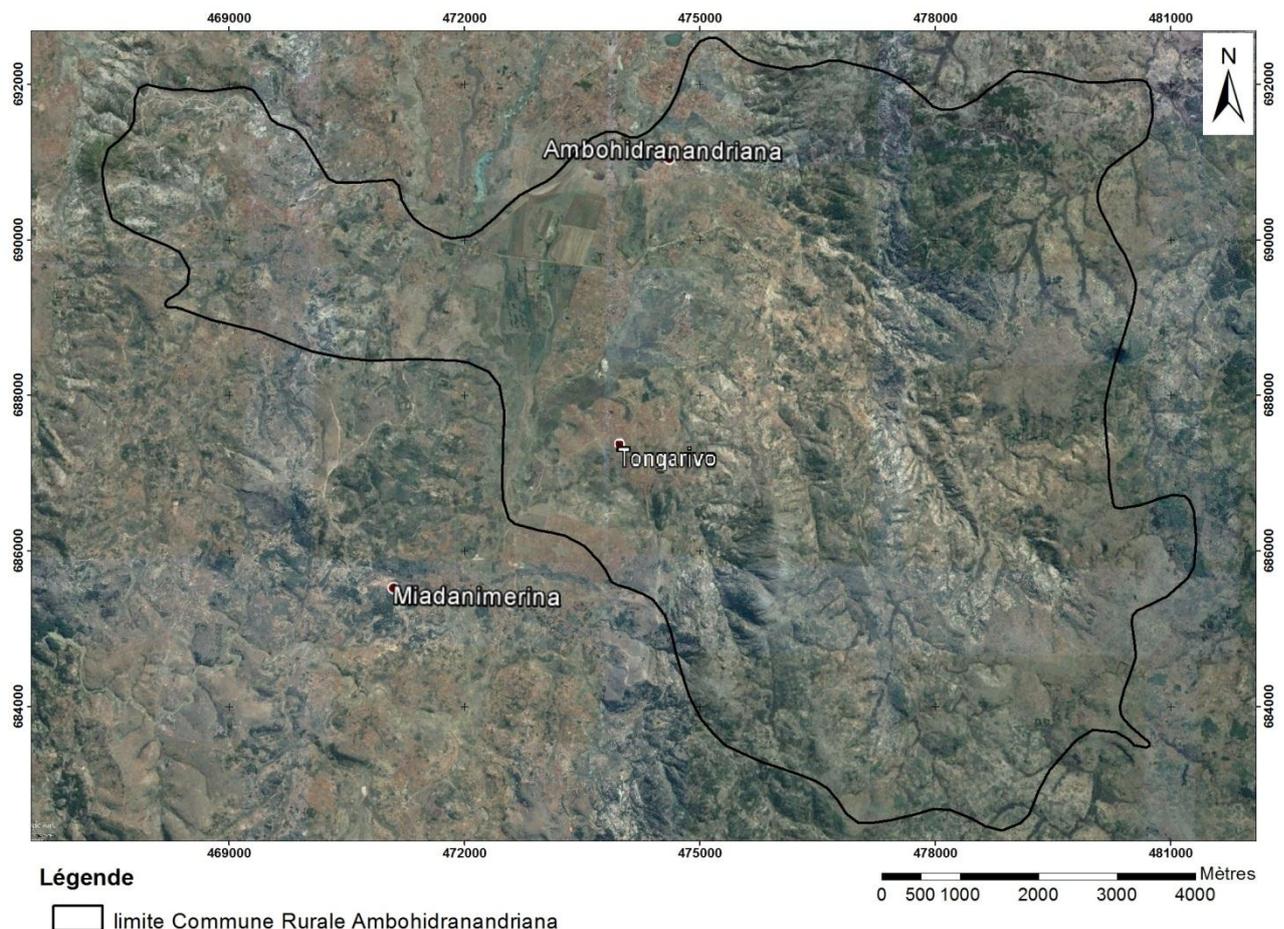


Figure 12 : image de la zone d'étude obtenue sur Google Earth servant de fond de carte pour l'étude

III.2.2. La descente sur terrain

Les travaux de terrain ont duré au total huit jours : six jours de levés géologiques au mois de Décembre 2014 et deux jours de levés géophysiques en Mai 2015. C'est pendant la descente qu'on a effectué l'étude des affleurements des formations présentes sur la Commune

Rurale d'Ambohidranandriana et de recueillir le maximum d'informations pour la suite de l'étude ainsi que pour la réalisation d'une carte géologique plus détaillée.

III.2.2.1. Visite de courtoisie

Avant d'effectuer les travaux proprement dit, nous avons commencé la première journée par la visite de courtoisie dès notre arrivée sur place. Cette étape consiste à rencontrer les autorités (Maire et Président du Fokontany) de la Commune pour nous présenter et leur exposer le but de notre venue. Leur collaboration nous a permis d'obtenir toutes les informations nécessaires sur la géographie physique, économique et sociale de la Commune. Une salle de la mairie nous a également été accordée pour l'hébergement.

III.2.2.2. Les travaux de reconnaissance et entretien avec les habitants locaux

La reconnaissance du terrain a tout de suite été entamée après les visites de courtoisie. Les entretiens avec la population locale nous ont beaucoup aidés et informés sur la disposition, la forme, l'épaisseur, l'étendue des minéralisations aurifère et ferrifère. On a pu alors observer que l'or de Tongarivo, l'un des fokontany de la Commune, y est exploité artisanalement et est contenu dans des veines et veinules de quartz encaissées dans des quartzites à oxyde de fer rubanés. Le choix des lieux de prospection de l'or a donc été conditionné par la présence de quartzite. De même pour le fer car il est en général porté par les lits sombres des quartzites ferrifères.

On a aussi remarqué que les sols sont très latéritisés et de couleur très variée : rouge, blanche, orange, jaune (Photo 2). Plus un sol est rouge, plus sa teneur en fer est élevée. Cela nous a conduits à établir une deuxième méthode de prospection : une prospection basée sur la couleur des sols. Par conséquent, nous avons décidé qu'à part les quartzites, les sites de prélèvements d'échantillons choisis pour l'analyse du fer sont les sols rouges.

III.2.2.3. Echantillonnage dans les puits de reconnaissance

Suivant la méthode de prospection adoptée, des puits de reconnaissance ont été implantés dans les zones aux sols rouges. Les quartzites ont également été échantillonnés. Les secteurs de prélèvement appartenaient alors aux Fokontany de Tongarivo et de Soamonina. La figure 13 montre la localisation des puits dont les coordonnées sont représentées dans le tableau 5. Il est à noter que le creusement des puits a procuré du travail aux habitants de la Commune. Le recrutement est tel que les hommes du Fokontany concerné sont recrutés en premier, c'est après, s'il en reste des puits à travailler, que viennent ensuite ceux des autres Fokontany.



Photo 2 : Variation de la couleur des sols de la zone d'étude

Les échantillons prélevés sont emballés dans des sacs en plastique transparents avec une étiquette au-dessus de laquelle sont écrit le lieu et le numéro du puits d'échantillonnage, le numéro de l'échantillon, tout cela sous forme codé. Les échantillons pèsent environ chacun 0,5 kg. Ils étaient ainsi prêts à être envoyés aux laboratoires pour une analyse sur lame mince (pétrographie microscopique) pour certains et l'analyse chimique pour d'autres.

Tableau 5 : caractéristiques physiques des puits de reconnaissance

N° puits	Coordonnées		Profondeur (m)	
	X (m)	Y (m)	Couver- ture	Echantillon
P1	473661	687657	0-0,6	0,6-2,5
P2	473600	687740	0-0,2	0-2,6
P3	473660	687564	0-0,4	0,4-4,5
P5	473713	687500	0	0-3
P6	473515	687627	2,2	0
P7	473516	687750	0	0-1,7
P8	473429	687842	0	0-1,2
P9	473633	687841	0	0-1,6
P10	473463	687942	0	0-1,2
P11	473400	687873	0	0-3
P12	473487	687780	0	0-3
P13	473487	687842	0	0-3
P14	473545	687688	3,2	0
P15	473603	687780	0-1	1-3,9
P16	473811	687586	0-0,9	0,9-4,2
P17	473574	687842	0	0-2,1
P18	473372	687996	2,8	0

N° Puits	Coordonnées		Profondeur (m)	
	X (m)	Y (m)	Couver- ture	Echantillon
P19	473371	687901	2	0
P20	473603	687657	0	0-2,7
P21	473830	687527	0-0,70	0,7-4,2
P22	473662	687515	1,5	0
P23	473370	687627	1,7	0
P24	473850	687685	0	0-2,2
P25	474017	687530	0-0,20	0,2-2,4
P26	474206	687737	0-0,40	0,4-3
P27	474356	687585	0-0,20	0,2-2,4
P28	474313	687742	0-0,20	0,2-2,4
P29	474141	687708	0-2	2-3,1
P30	473860	687861	0-0,80	0,8-3,3
P31	473747	687564	0	0-1
P35	474241	687993	0-0,6	0,6-2
P36	473632	687626	0-0,6	0,6-2,2
P37	473602	687688	0-1,10	1,1-2,1
P38	473574	687810	0-0,5	0,5-1,9

P39	474012	688153	0-0,6	0,6-1,2
P40	473896	688178	2	0
P42	473751	688059	0-0,20	0,2-0,9
P43	473662	687949	0-0,20	0,2-0,7
P44	474233	688312	0-0,70	0,7-1,2
P45	474307	688243	2,3	0
P47	474433	687935	0-0,30	0,3-2,5
P50	472990	688288	2	0
P51	473043	688409	2	0

P52	473260	688669	0,9	0
P53	473271	688856	1,5	0
P54	473356	689059	1,5	0
P55	473251	687857	0	0-0,5
P56	473641	687445	0-2	2-3
P57	473450	687661	0	0-1
P58	473605	687450	0	0-1,5
P59	473601	687545	0	0-2

CARTE DE LOCALISATION DES PUIXS DE RECONNAISSANCE

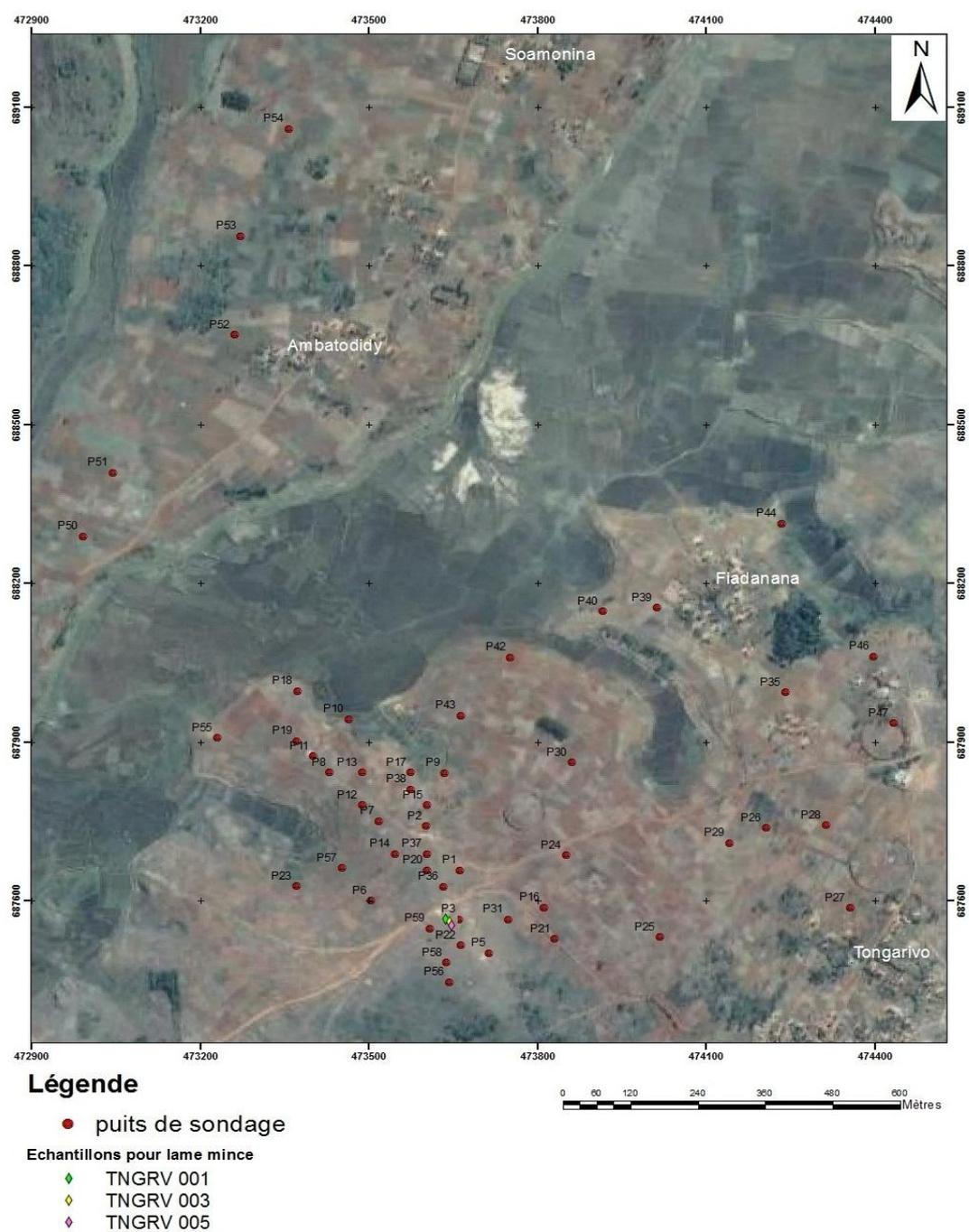


Figure 13 : Carte de localisation des puits de reconnaissance

III.2.2.4. Prospection géologique détaillée : lever géologique, mesure et échantillonnage

Cette étape consiste à parcourir la zone d'étude de façon systématique afin d'obtenir toutes les informations nécessaires à la cartographie géologique détaillée de la Commune d'Ambohidranandriana. En effet, comme tout lever géologique, nous avons traversé la zone perpendiculairement à la direction des couches qui varie du N160 à N30. Nous avons relevé les directions et pendages des différentes formations géologiques, l'épaisseur des couches, leur délimitation et positions géographiques par GPS. Le prélèvement de quelques échantillons représentatifs des formations a aussi été nécessaire pour une description macro et microscopique plus précise. Côté structural, nous avons également noté les directions des différentes fractures, cassures et diaclases qui ont affecté les lieux. Des coupes géologiques rapides ont été effectuées suivant la nécessité.

III.2.2.5. Levers géophysiques

Le lever géophysique a eu pour but de déterminer l'étendue et l'épaisseur des bancs de quartzites minéralisés en fer afin d'en estimer le volume. Faute d'appareils géophysiques magnétiques, nous avons opté pour une méthode électrique. Cette investigation sera détaillée plus largement plus tard dans le chapitre 4.

III.2.3. Après descente sur terrain

Après le terrain, les travaux consistaient au travail de laboratoire, la cartographie, les traitements (géophysique, chimique...) et l'interprétation des résultats.

III.2.3.1. Les travaux de laboratoire

a. Confection de lames minces

La confection des lames minces a été réalisée auprès du laboratoire des mines à Ampandrianomby. Trois lames minces ont été taillées à partir des échantillons prélevés aux points de coordonnées rapportées dans le tableau 6. Leur positionnement géographique est représenté sur la carte de localisation des puits de sondage à la figure 13 de la page précédente. Ces échantillons ont été extraits des quartzites ferrifères et des veines de quartz porteurs d'or.

Le processus de confection des lames est décrit dans l'annexe IV. Les lames confectionnées sont observées au microscope sous lumière transmise.

Tableau 6 : Caractéristiques des échantillons utilisés pour la confection de lames minces

Roches échantillonnées	Nom échantillon	X (m)	Y (m)
Quartzite ferrifère	TNGRV 001	473626	687 567
Veines de quartz interstratifiées	TNGRV 003	473635	687 559
Veines de quartz sécantes	TNGRV 005	473 636	687 552

b. Analyse chimique des échantillons

Les échantillons prélevés dans les puits de sondage de reconnaissance ont fait l'objet d'une analyse chimique. Notons que cette dernière a été effectuée auprès du laboratoire de l'HOLCIM Ibity.

III.2.3.2. Cartographie

Le travail de cartographie géologique a d'abord commencé par l'exploitation des données renseignées par l'image obtenue sur Google Earth, notre fond de carte. En effet, les variations de teinte informent sur les différentes formations existantes. En se référant aux bases de données et cartes existantes, on peut déterminer la formation correspondante à chaque teinte. On peut ainsi tracer la limite des couches. Linéaments et cours d'eau peuvent également être dessinés. Ces travaux s'accomplissent lors des préparatifs.

Ensuite, des vérifications sont effectuées au cours de la descente sur terrain. Plus de détails seront également apportés à la carte : certaines formations non discernées sur le fond de carte, à cause de leur petite taille par exemple, seront ajoutées à celui-ci. Les mesures structurales (direction, pendage des couches...) seront aussi présentées sur la nouvelle carte.

Lorsque toutes les données sont réunies, on peut procéder à la numérisation de la nouvelle carte géologique. Pour notre cas, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS version 10.0. pour cette mise à jour de la carte géologique.

III.2.3.3. Traitement des résultats

Les résultats d'analyse chimique ont été traités sur Surfer 12 et ceux du lever géophysique sur RES2DINV afin d'être interprétables.

Tous les résultats seront présentés dans la partie 3 « Résultats et Interprétation » mais avant cela, nous allons détailler plus particulièrement le lever géophysique dans le chapitre 4 qui suit.

CHAPITRE 4 : LE LEVER GEOPHYSIQUE

La géophysique est une discipline qui utilise toutes les méthodes quantitatives de la physique pour obtenir des informations sur les zones cachées du globe. La géophysique est donc un outil de reconnaissance des sites qui donne, à partir de la surface du sol, des images des formations géologiques souterraines grâce aux grandeurs physiques qui les caractérisent. Il existe plusieurs méthodes selon la cible : la méthode électrique, la méthode électromagnétique, la méthode sismique, le radar, la gravimétrie... Pour notre cas, comme il a déjà été énoncé auparavant, nous avons appliqué la méthode électrique par le fait que notre cible est formée par les quartzites à oxyde de fer dont on veut déterminer la forme, la puissance et l'extension.

VI.1. La méthode électrique

Il existe quelques techniques d'acquisition de données en méthode électrique mais la plus utilisée est la tomographie de résistivité électrique et c'est celle qu'on a effectuée sur terrain.

VI.1.1. Notion de résistivité et de chargeabilité électriques

La résistivité électrique

La résistivité d'un matériau représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. La résistivité d'un matériau est l'inverse de la conductivité : plus un matériau est conducteur (respectivement résistant), moins il est résistant (respectivement conducteur). Dans le cas d'une roche saturée en eau, par exemple, la résistivité globale du milieu correspond à la combinaison des résistivités de la roche et de l'eau. L'unité de la résistivité est l'Ohm mètre ($\Omega.m$).

Certains minéraux sont très conducteurs : quelques sulfures (pyrite, galène), certains oxydes (magnétite, hématite), le graphite, l'or, l'argent, le platine... La résistivité de ces minéraux conducteurs est de l'ordre de 0,01 ohm.m. Mais pour que ces minéraux puissent modifier la résistivité de la roche il faut :

- que la quantité soit suffisante (exemple : sable aurifère à 0,6 g/t : insuffisant) ;
- que " l'habitus " soit dendritique, un habitus granulaire a beaucoup moins d'effet, ceci à cause du contact imparfait entre les minéraux ;

- que la roche soit sous le niveau hydrostatique surtout lorsque le minéral est dispersé en grains qui ne sont pas jointifs. Dans le cas où la roche est sèche, elle n'est pas affectée par la présence de ces minéraux conducteurs, elle reste infiniment résistante.

La résistivité d'une roche s'étend entre une plage de valeur. Lors de l'interprétation des coupes géoélectriques de résistivité et de chargeabilité, le profil de résistivité détermine le nombre de couches présentes. Les valeurs de chargeabilité permettent ensuite de mieux caractériser chaque formation définie.

La chargeabilité électrique

Lorsqu'on injecte du courant dans le sous-sol, on suppose que le potentiel mesuré en surface est obtenu instantanément et que d'une façon similaire, lorsque le courant est coupé, le potentiel tombe instantanément. En pratique, ce n'est pas le cas, il existe un délai entre l'instant où un milieu est « chargé » au maximum et l'instant où son potentiel redevient nul, c'est la chargeabilité. La chargeabilité est donc un paramètre qui traduit la facilité du matériau à se polariser, c'est-à-dire sa capacité à retenir l'énergie sous forme électrochimique. Elle est due surtout aux effets du sol. La chargeabilité s'exprime en mV/V ou en secondes.

Jusqu'à présent, l'interprétation du profil de chargeabilité est en général basée sur les différentes constatations. Ce paramètre est le plus souvent utilisé pour la caractérisation d'une nappe aquifère. En effet, les profils de chargeabilité reflètent la teneur en argile d'un milieu, son degré de fracturation ou sa porosité, sa teneur en sel... Il a été constaté que plus la chargeabilité est élevée, plus la teneur en argile est élevée et moins la nappe est bonne. Une grande chargeabilité relative à des valeurs supérieures à 10mV/V correspond donc à une faible porosité. Par contre, une faible chargeabilité relative à des valeurs inférieures à 10mV/V correspond à une grande porosité de la roche, permettant l'emménagement de quantité importante d'eau dans la roche. Une formation aquifère est donc à la fois à faible résistivité (conductrice) et à faible chargeabilité.

A part la présence d'argiles (illite, montmorillonite...), une forte chargeabilité peut également indiquer la présence de sulfures ou d'oxydes métalliques ou encore de contaminants organiques.

VI.1.2. La tomographie de résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique, ou panneau électrique 2D, est une technique de prospection électrique par courant continu qui consiste à déterminer les propriétés des sols

par la mesure de leur résistivité. C'est donc la mesure de la résistivité électrique du sous-sol selon un profil linéaire suite à l'injection d'un courant continu entre deux électrodes à la surface du sol et de mesurer la différence de potentiel induite entre deux autres électrodes. On utilise des multiélectrodes d'injection et des multiélectrodes de mesure de la différence de potentiel afin de réaliser une série de mesure programmée en avance. On obtient en même temps la variation latérale et verticale de la résistivité et de la chargeabilité électriques du sous-sol dont le traitement et l'interprétation permettent d'obtenir une coupe de la géologie de celui-ci au droit du profil.

En fonction de la profondeur d'investigation souhaitée et des objectifs à atteindre, plusieurs configurations sont à portée de main : Wenner, Schlumberger, Pôle-Dipôle, Pôle-Pôle pour ne citer que les principaux. Ils diffèrent entre eux par la disposition du dipôle d'injection (AB) et du dipôle de mesure (MN) (figure 14). Plus la distance AB est grande, plus la profondeur d'investigation est élevée.

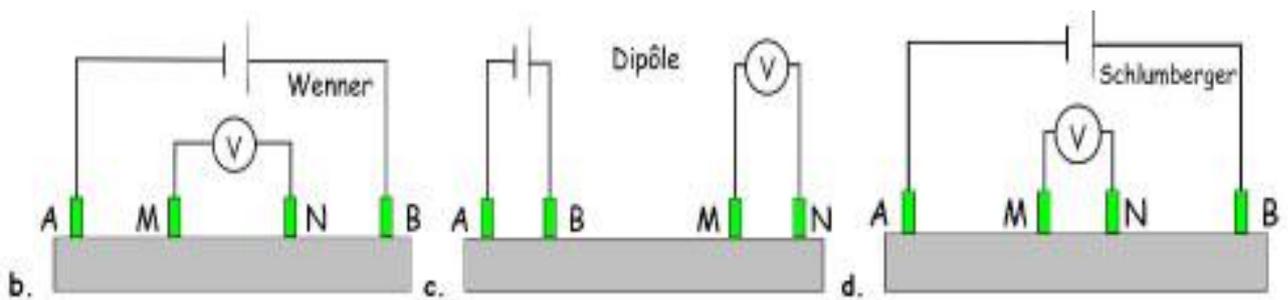


Figure 14 : différents types de dispositif d'acquisition de données en tomographie électrique

VI.2. Le dispositif de Wenner

D'après nos entretiens avec les locaux, la profondeur des quartzites ne dépasse pas 50 m. Le dispositif choisi est donc le type Wenner.

Le dispositif de Wenner est un dispositif classique, utilisant N électrodes, c'est-à-dire un dispositif multi-électrodes. La mesure s'effectue selon une séquence particulière par variation des électrodes d'injection et de mesure. Soit "na" la distance inter-électrodes où n est le nombre de la séquence de mesures qui s'incrémente de 1 à $(N-1)/3$, si le nombre d'électrodes total N est égal à un multiple de 3 plus 1.

Pour la première séquence de mesures (figure 13), la distance inter-électrodes est égale à 1a. La première série de mesures débute d'abord avec les électrodes 1, 2, 3 et 4 dont les électrodes 1 et 4 sont utilisées comme électrodes de courant et les deux autres électrodes 2 et

3 comme électrodes de potentiel. La seconde série de mesures utilise ensuite les électrodes 2, 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les séries de mesures soient terminées.

Nous passons après à la seconde séquence de mesures dont la distance inter-électrodes s'incrémente à 2a. On effectue les autres séries de mesures. L'opération continue jusqu'à ce que toutes les mesures possibles soient effectuées. Dans le cas général utilisant N électrodes, le nombre total de mesures m, pour un profil dont la distance entre deux électrodes = na, a pour expression : $m = \Sigma (N-3n)$ où $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Nous montrons dans la figure 15 la représentation de la séquence de mesure pour un dispositif de Wenner.

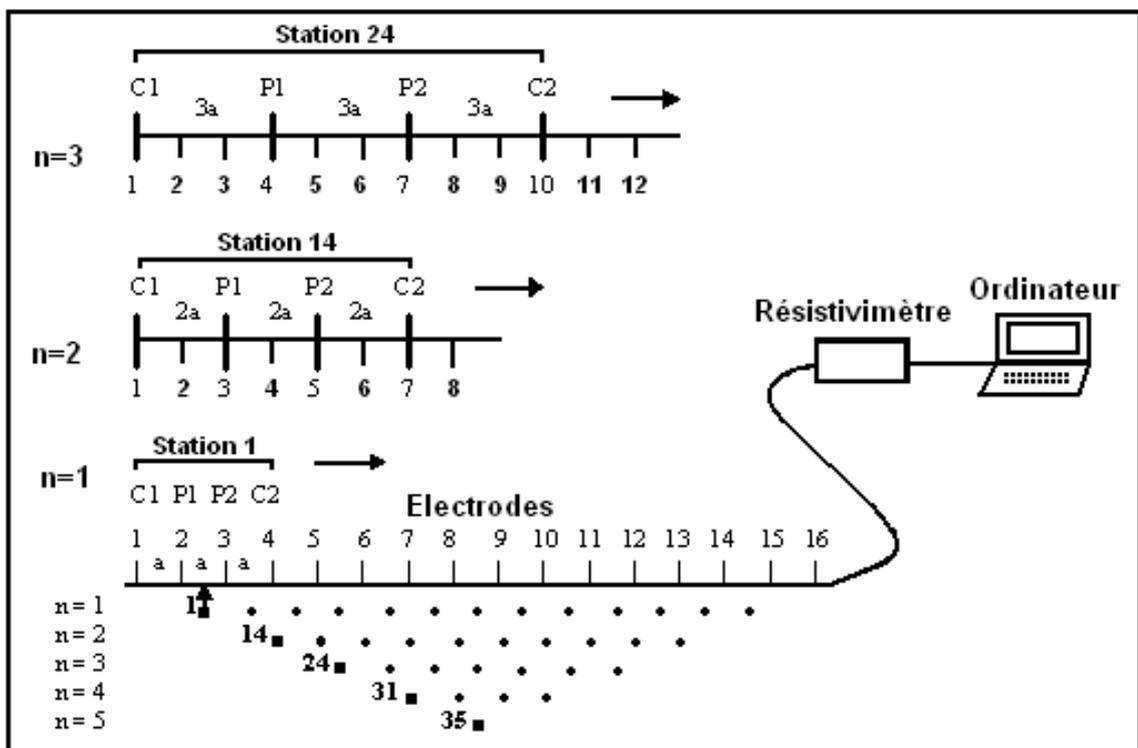


Figure 15 : Représentation de la séquence de mesure pour un dispositif de Wenner

VI.3. Mise en œuvre et acquisition des données

La première étape de la réalisation d'un profil électrique consiste en l'implantation des électrodes métalliques à 20 cm de profondeur, espacées de 0.5 à 5 mètres chacune, et reliées entre elles par un câble électrique 32 voies. Le câble est à son tour relié au Syscal et ses accessoires et l'ensemble sera à la fin connecté à un ordinateur qui affiche les résultats des mesures comme le montre la figure 16.

Pour notre cas, nous avons utilisé 32 électrodes espacées de 3 m et deux câbles multiélectrodes de part et d'autre du milieu du profil. La longueur totale de notre profil est donc de 93 m.

VI.3.1. Les matériels

Le résistivimètre électrique utilisé est le SYSCAL R2 développé par Iris Instruments. Cet appareil est employé avec un convertisseur DC/DC de 250 Watts (permet de transformer la tension 12V en 100, 200, 400 ou 800V) et un multiplexeur RCM (interface de communication entre le résistivimètre et les multinodes), tous les deux alimentés par une batterie de 12V. Le multiplexeur, quant à lui, est relié à deux multinodes (boîtiers à 16 électrodes permettant de reconnaître les électrodes) où les câbles numérotés des 32 électrodes sont branchées (Photo 3). Mais avant toute mesure, il faut tout d'abord procéder à la programmation de la séquence de mesure sur le micro-ordinateur avec le dispositif choisi (ici Wenner). Ceci est possible avec le logiciel ELECTRE II. Un autre logiciel, PROSYS, permet, une fois la séquence programmée, de la transférer au résistivimètre. On peut alors procéder à la mesure proprement dite.

Un courant de l'ordre de 200 milliampères (mA) est injecté dans les électrodes afin de remonter à la résistivité apparente des terrains situés au droit de la zone d'étude. Il ne reste plus qu'à attendre pendant que l'ensemble effectue l'acquisition des données.

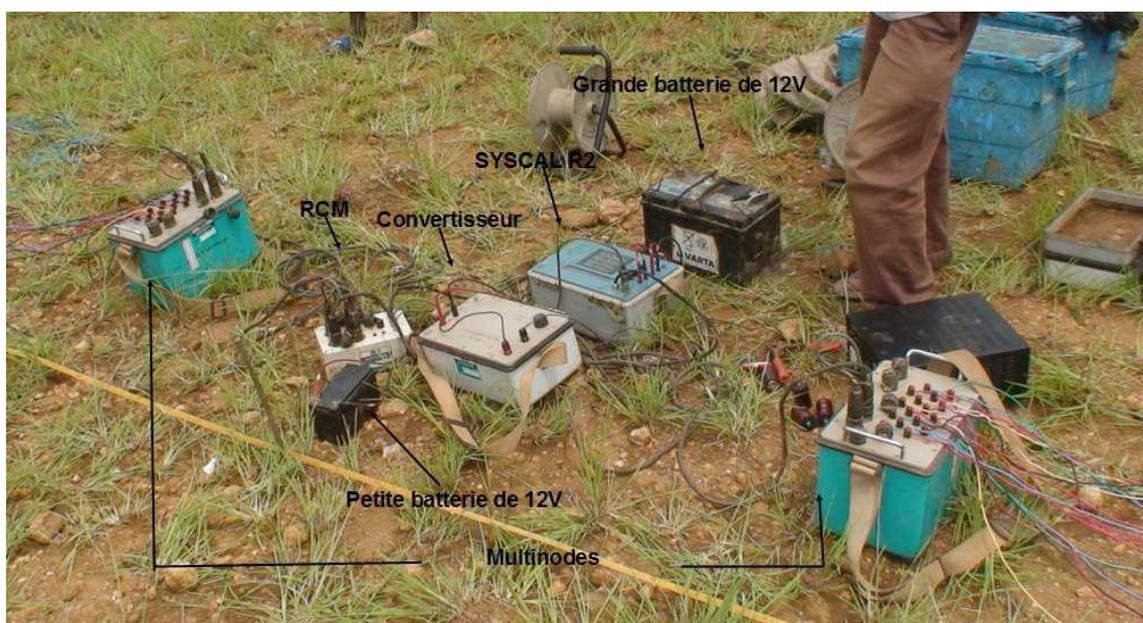


Photo 3 : Le resistivimètre Syscal 1 et ses accessoires

Schéma de principe d'acquisition des mesures de résistivité électrique et de chargeabilité.

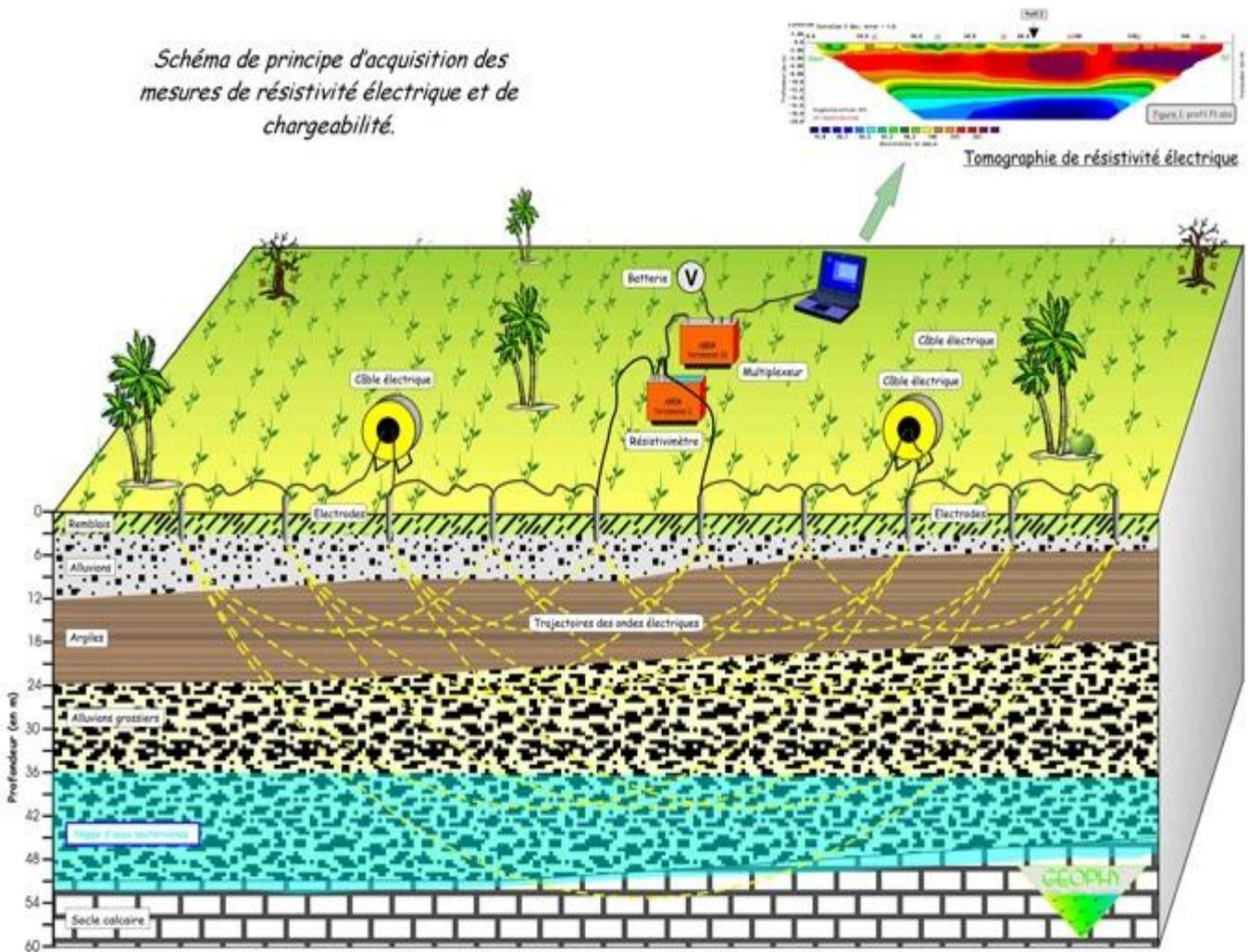


Figure 16 : schéma de principe d'acquisition des mesures de résistivité électrique et de chargeabilité

I.1.1. Les profils réalisés

Trois profils électriques, de direction Ouest-Est et de façon plus ou moins parallèles, ont été effectués comme le montre la figure 17. La durée d'acquisition pour un profil a été d'environ vingt minutes, plus le temps d'installation du dispositif qui est de trente minutes, soit environ une heure au total par profil. Une fois l'acquisition pour un profil terminée, les données sont ensuite transférées sur ordinateur pour être traitées et on passe au profil suivant. Ci-après les coordonnées des profils réalisées (Tableau 7).

Tableau 7 : caractéristiques des profils électriques réalisés

Nom profil	Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
AB	A	473711	687553	1614
	Centre	473666	687542	1618
	B	473622	687532	1614
CD	C	473711	687599	1611
	Centre	473664	687590	1612
	D	473620	687579	1609
EF	E	473675	687653	1601
	Centre	473634	687633	1605
	F	473592	687617	1605



Figure 17 : Implantation des lignes de coupe géophysiques

Voici quelques images du lever géophysique en photos (Photos 4, 5, 6, 7 et 8).



Photo 4 : Implantation des électrodes



Photo 5 : électrode implanté relié au câble



Photo 6 : Branchement du câble multiélectrode au multinode



Photo 7 : câble multiélectrode branché au multinode branché



Photo 8 : Entretien avec les orpailleurs

CONCLUSION PARTIELLE

Les recherches bibliographiques combinées à l'utilisation des différentes cartes existantes et les travaux de terrain constituent un moyen efficace pour la cartographie géologique et a permis de délimiter particulièrement les limites des quartzites à oxyde de fer et or de la colline de Tongarivo. Des échantillons ont été récoltés pour une analyse chimique d'une part et pétrographique d'autre part respectivement afin de déterminer la teneur en oxyde de fer des quartzites de Tongarivo et d'étudier l'origine des minéralisations. Des levés géophysiques électriques ont été aussi effectués pour déterminer l'épaisseur des bancs minéralisés en oxyde.

PARTIE III :
RESULTATS ET
INTERPRETATION

CHAPITRE 5 : PRESENTATION DES RESULTATS

Parmi les objectifs fixés dans l'introduction figure la confection de la carte géologique de la zone d'étude. Les différentes observations et travaux effectués avant et lors de la descente sur terrain nous ont permis de déterminer les formations existant à l'intérieur du périmètre étudié. Ainsi, nous allons présenter parmi les résultats la géologie de la zone d'étude avec la carte géologique à plus grande échelle que nous avons réalisée ainsi que les résultats des analyses chimiques et microscopiques et ceux de l'investigation géophysique électrique.

V.1. Résultats cartographiques

V.1.1. Les formations géologiques de la zone d'étude

V.1.1.1. Les roches métamorphiques

Comme il a été décrit dans le premier chapitre, géologiquement, la Commune Rurale d'Ambohidranandriana appartient au domaine d'Antananarivo. L'ensemble de la zone est dominée majoritairement par les roches métamorphiques qui sont constituées dans l'essentiel de gneiss et migmatites, de schistes et de niveaux de quartzite.

a. Les gneiss et migmatites

La majeure partie de la zone est dominée par des gneiss leucocrates. Certains deviennent parfois riches en biotite et évoluent en couleur gris sombre. L'orientation des minéraux constitutifs est bien visible aux affleurements. Des ségrégations de quartz et de feldspath de taille et forme variables s'observent un peu partout. Certains constituent des masses de pegmatites (pegmatite graphique) comme des poches dans les gneiss (photo 9) ; d'autres intercalées en concordance avec la foliation de la roche (Photo 10). Dans la partie élevée de l'Est, les roches sont plus enrichies en feldspaths, donnant par en endroit une structure porphyroïde et un aspect très rugueux au toucher. Les feldspaths prennent même parfois une forme ovoïde conférant à l'ensemble une structure ocellée (Photo 11). Des bandes de roches composées essentiellement de quartz et de feldspaths potassiques qui leur attribuent une couleur rose sont intercalées dans les migmatites (Photo 12). Leur dimension varie du centimètre au mètre. Leurs grains sont de taille variable, donnant ainsi des aplites ou des granites. Tous ces aspects ont permis à dénommer l'ensemble comme étant de la migmatite.



Photo 9 : Pegmatites graphiques en poche dans le gneiss

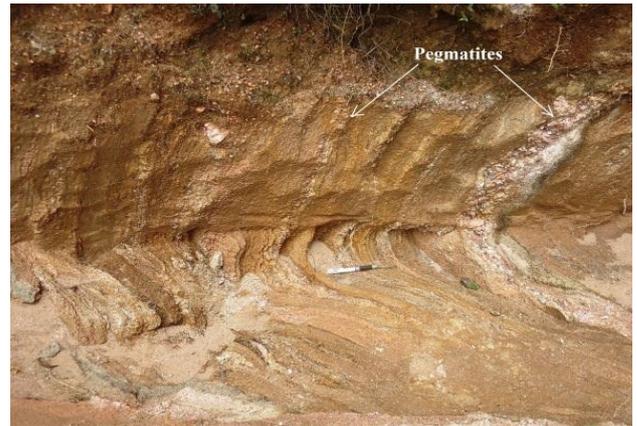


Photo 10 : ségrégation de quartz et feldspath donnant des pegmatites concordante à la foliation



Photo 11 : aspect oeilé du feldspath potassique dans le gneiss surmicacé avec intercalation d'aplite



Photo 12 : bande de granite de 2 mètres dans la migmatite

Une partie de la bande graphiteuse (Photo 13), mentionnée sur la carte de Besairie (1974), est retrouvée en affleurement en intercalation dans les migmatites, de façon concordante à la stratification de celles-ci (N30 / 45°W), au point de coordonnées X = 475 103 m et Y = 686 952 m. Elle mesure 2,5 m d'épaisseur.



Photo 13 : Bande graphiteuse (en gris) intercalée dans la migmatite

b. Les quartzites

Deux types de quartzites ont été observés sur les lieux à savoir les quartzites ferrifères rubanés et les quartzites francs.

- *Les quartzites à oxyde de fer*

Ces quartzites s'observent au niveau de Tongarivo. Ils sont de taille très réduite par rapport à l'étendue de la zone. Ils se présentent en lentille de 77 mètres de large et 250 mètres de long en affleurement. La direction générale de la formation est de N 160 avec un pendage variant de 45° à 85° SW, concordant avec son encaissant micaschisteux. Les quartzites sont lités (Photo 14) : alternance de lits sombres riches en oxyde de fer (brun à rouge si altérés) et de lits clairs riches en quartz, et se débitent en plaquettes (quartzites en plaquettes) en surface (Photo 15). Les litages sont de dimension millimétriques à centimétriques. Les quartzites sont fracturés. Des couches de micaschistes s'intercalent quelques fois dans ceux-ci.

Sur le flanc nord-ouest de la colline de Tongarivo, au point de coordonnées X = 473 338 m et Y = 687 857 m, des encroûtements en cuirasse ferrugineux d'une épaisseur de 50 centimètres au maximum se sont développés en surface sous forme de concrétions (Photo 16). Ces dernières ont un aspect très dure et consolidé.



Photo 14 : Aspect lité du quartzite à oxyde de fer de Tongarivo



Photo 15 : Des quartzites à oxyde de fer en plaquettes



Photo 16 : Encroûtement en cuirasse ferrugineux

- *Les quartzites blancs*

A l'Est de Tongarivo, au pied des migmatites de l'Angavo se dressent trois lentilles alignées de quartzites blancs de plus grandes tailles par rapport aux précédents (entre 150 et 300 m de long chacun et environ 100 m de large) mais la présence de l'or n'y est pas signalée. En certains points, on observe une proportion assez notable en feldspaths dans les quartzites aboutissant aux leptynites.

c. Les veines de quartz

Les veines de quartz aurifères sont encaissées dans les quartzites à oxyde de fer. Deux types de veines ont été reconnus : les veines concordantes au rubanement des quartzites et les veines sécantes. Le creusement des galeries de façon perpendiculaire au litage et à la

disposition des plaquettes de quartzite tel que l'on peut voir sur la photo n°17 suppose qu'à part les veines interstratifiées, les veines sécantes à la stratification sont aussi minéralisées par le fait que les mineurs suivent la direction des veines. Cependant, ce n'est pas le cas. Les observations, enquêtes et ré-enquêtes auprès des orpailleurs nous ont permis de reconnaître que seules les veines interstratifiées dans les litages des quartzites sont minéralisées en or.

Les veines sécantes, non minéralisées, sont formées par des quartz bien cristallisés. Par contre, les veines concordantes ont un aspect carié (photo 18) laissant penser que les vides renfermaient des cristaux de sulfures comme la pyrite mais qui, par altération, se sont oxydés et se sont transformés en oxyde de fer. Leur dissolution a ainsi laissé place à des pores donnant l'aspect carié.

Dans les deux cas, la dimension des veines varie du millimètre à quelques centimètres selon les orpailleurs.



Photo 17 : galerie creusée de façon sécante aux foliations et disposition des plaquettes de quartzites à oxyde de fer



Photo 18 : aspect carié de la veine aurifère interstratifiée

d. Les micaschistes

Les micaschistes sont les encaissants des quartzites de la zone d'étude. Certaines couches sont intercalées dans les migmatites. La direction générale de foliation de ces formations est comprise entre N 160 à N 185, de pendage comprise entre 45° à 85° SW. Leur couleur varie du rouge-pourpre à rose. En général, ils sont très altérés voir même latéritisés.

e. Les amphibolites

Des petits niveaux d'amphibolite sans grande extension sont intercalés dans la formation micaschisteuse et migmatitique. Au point de coordonnées X = 473358 m et Y = 687626 m affleure par exemple un banc d'amphibolite de direction N 160, d'une longueur d'environ 30m et 6m de large.

Il est à noter que lors de notre descente sur terrain, malgré les négociations, nous n'avons pas eu la permission de travailler dans les carrés miniers d'un ressortissant étranger situés plus loin au Sud de Tongarivo mais qui font cependant encore partie de notre zone d'étude. Pourtant, une personne travaillant dans ces carrés nous a indiqué qu'il existe de la dolomie à l'intérieur de leur périmètre et nous a montré des échantillons. Nous n'avons pas par conséquent pu circonscrire les limites de ces dolomies sur notre nouvelle carte géologique alors que leur présence constitue un point très important pour notre étude.

V.1.1.2. Les roches volcaniques

Les formations volcaniques sont nombreuses dans la zone d'étude. Ils se concentrent surtout à l'Est et à l'Ouest. Ils s'altèrent en rognon. Certains cônes volcaniques sont encore conservés. Le plus connu et très reconnaissable est le piton volcanique de Vontovorona qui est constitué de trachyphonolite (Photo 19).

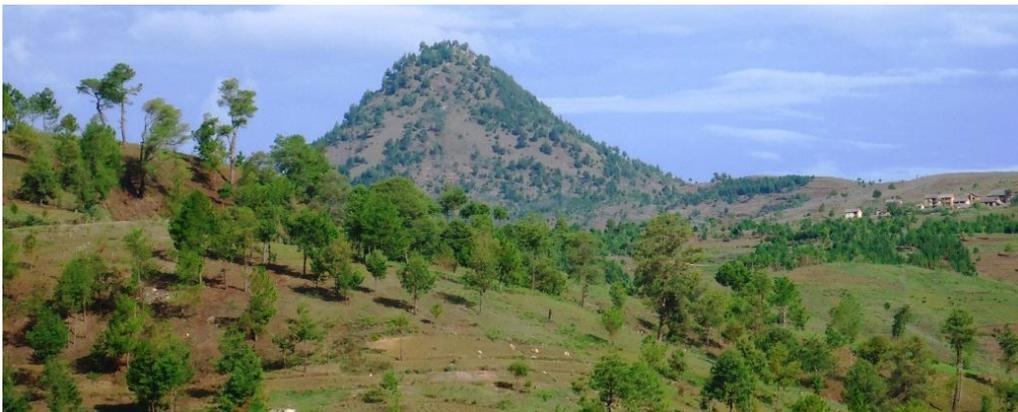


Photo 19 : Le piton volcanique de Vontovorona

V.1.1.3. Les roches magmatiques plutoniques

Des dômes de granites ont été observés mais ils n'appartiennent pas à la Commune d'Ambohidranandriana, ils se situent au sud-est de la zone. Par contre, des petits dômes de granites intrusifs sont recensés le long de la route vers Vontovorona et à Tongarivo. On a

également rencontré des granites pegmatitiques qui forment des patates d'environ 20m de rayon. Elles sont composées minéralogiquement de quartz, orthose et mica. Les cristaux d'orthoses atteignent jusqu'à 10cm de dimension (photo 20).



Photo 20 : un cristal d'orthose de 10 cm extrait du granite pegmatitique au point de coordonnées X = 472931m et Y = 687281m

V.1.1.4. Les sédiments

a. Les sédiments lacustres

Une partie des sédiments lacustres du bassin d'Antsirabe affleure au Nord de notre zone d'étude. Ce sont des sols fertiles aménagés en champ de culture par les habitants (photo 21). Son contact avec la formation migmatitique de l'Est est limité par la faille de la Manandona. Ces sédiments sont bordés à l'ouest et au Sud par la rivière Manandona et ses affluents.



Photo 21 : sédiments lacustres au pied de l'escarpement de Manandona aménagés en champ de culture.

b. Les alluvions

Les alluvions s'observent le long des rivières et cours d'eau. Ils s'étendent surtout au centre de la zone.

V.1.2. Aspect structural

L'aspect structural de la zone d'étude donne une direction des formations généralement uniforme N-S mais avec quelques variations locales (N160 à N30), et un pendage vers l'Ouest. Quelques intrusions granitiques s'imposent parfois à l'intérieur des couches.

❖ *Tectonique cassante*

A « plus grande échelle », la tectonique cassante est marquée par deux grandes failles: la faille de la Manandona au Nord, de direction N08, et une autre au Sud, de direction presque également N-S qui semble être une continuité de la précédente.

A l'échelle locale, failles, linéaments, fractures, cassures ainsi que diaclases ont fait l'objet de mesure systématique lors de la mission de terrain. La carte géologique établie (figure 19) montre qu'ils se concentrent surtout dans la partie migmatitique élevée de l'Est. Aucune déformation cassante n'a par contre été recensée dans la zone micaschisteuse. Après synthèse des mesures, on a conclu que toutes les discontinuités s'orientent dans trois directions principales : N08 à N16, N112 à N118 et N150 à N160. Ces déformations cassantes coïncident surtout aux lits des rivières, supposant que ces dernières ont suivi des zones de moindre résistance. Ils sont aussi très visibles à l'échelle de l'affleurement (Photo 22).



Photo 22 : fractures observées sur les quartzites (les traits en noir sont tracés dans le but de mettre en relief les fractures et leur continuité)

❖ *Tectonique souple*

Certains quartzites et gneiss présentent quelques petits plis et plissements (Photo 23) mais de moindre importance. Des boudinages ont également été observés (Photo 24).



Photo 23 : plissement du quartzite



Photo 24 : boudinage d'amphibolite dans du gneiss

En guise de synthèse, ci-après à la page suivante la nouvelle carte géologique établie (figure 19) ainsi qu'une coupe géologique suivant le trait AB (figure 18).

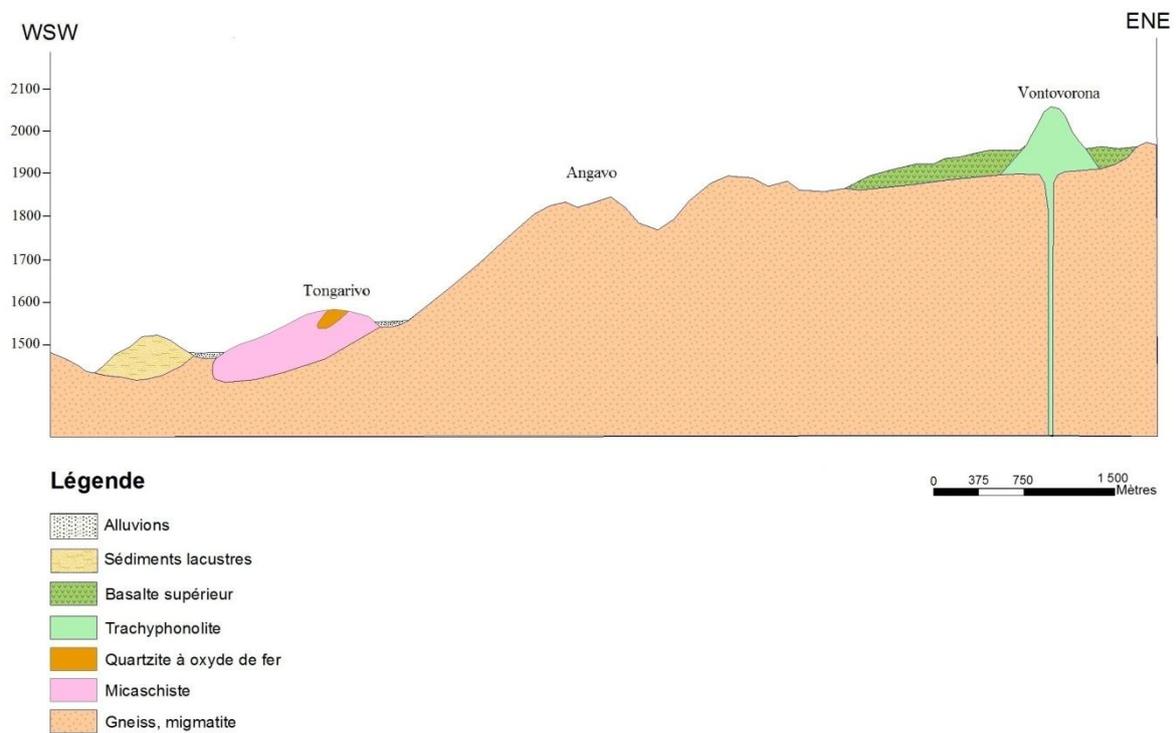


Figure 18 : Coupe géologique suivant le trait AB

CARTE GEOLOGIQUE DE LA COMMUNE RURALE D'AMBOHIDRANANDRIANA

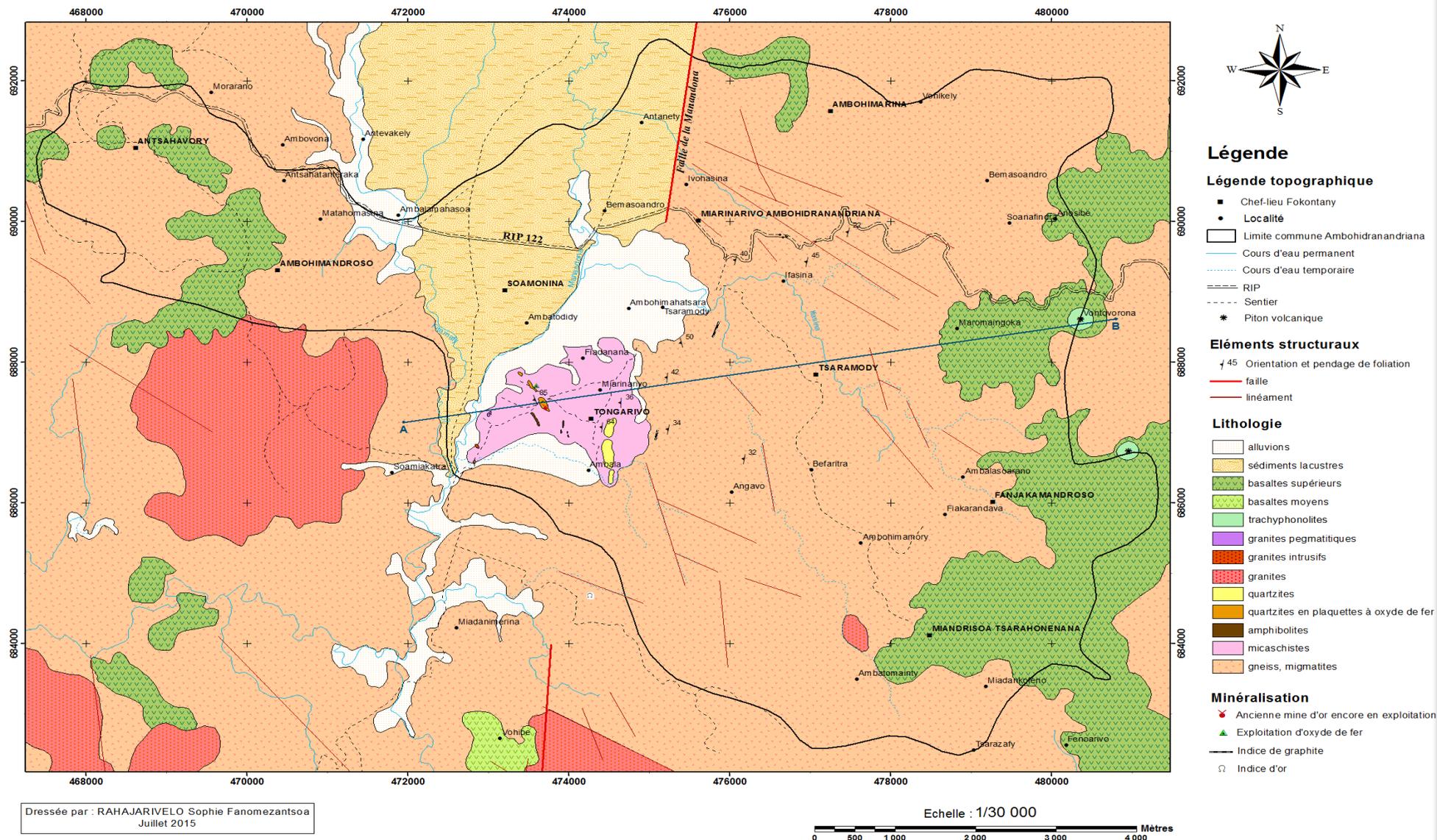


Figure 19 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après Besairie H.), mise à jour par l'auteur

V.2. Les résultats d'analyse microscopique

Il s'agit ici d'étudier des lames minces de roche au microscope à la lumière transmise. Le but est de déterminer les caractéristiques fines des phases minérales constitutives afin d'en tirer les significations pétrogénétiques permettant de proposer un modèle de mise en place des minéralisations à oxyde de fer et or. Les échantillons observés sont des échantillons de quartzites à oxyde de fer et des veines de quartz (interstratifiées et sécantes).

V.2.1. Les quartzites à oxyde fer

En lumière naturelle, les quartzites ne montrent que deux types de minéraux (figure 20) :

- quartz : 60%
- oxydes de fer : 40%

Les quartz sont incolores en lumière naturelle et avec une teinte de polarisation gris blanc du premier ordre en lumière polarisée. Ils présentent des craquelures.

Les oxydes de fer sont opaques. Ils sont formés principalement par des magnétites et hématites. Des taches brunes se dessinent le long des limites du lit d'oxydes de fer. Ce sont des hydroxydes de fer produits par altération météorique car le litage a permis la circulation d'eau.

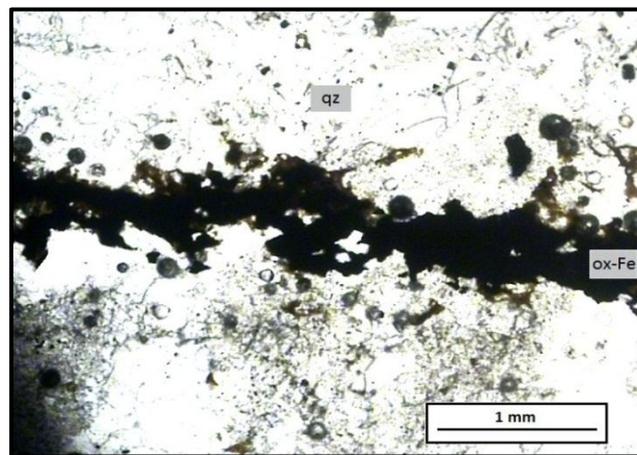


Figure 20 : échantillon de quartzite à oxyde fer en LN (x 5) montrant un lit d'oxyde de fer entre les lits de quartz. qz : quartz, ox-Fe: oxyde de fer

V.2.2. Les veines de quartz

➤ *Les veines interstratifiées*

Les veines de quartz interstratifiées montrent au microscope (figure 21 et 22) :

- du quartz : 90 %

- des minéraux opaques : 9,5 %
- des actinotes : 0,5 %

Les actinotes (amphiboles calciques) sont bien cristallisées en baguettes allongées sous forme d'aiguilles. Leur taille varie de 0,05 mm à 0,3mm. En lumière naturelle, ils sont à relief moyen à fort, de couleur verte avec un pléochroïsme net du vert jaune au vert bleuté. En lumière polarisée, leur teinte de polarisation est vive du second ordre. On a remarqué que les actinotes ont une orientation préférentielle d'allongement d'une part et que l'échantillon est affecté de fractures d'autre part.

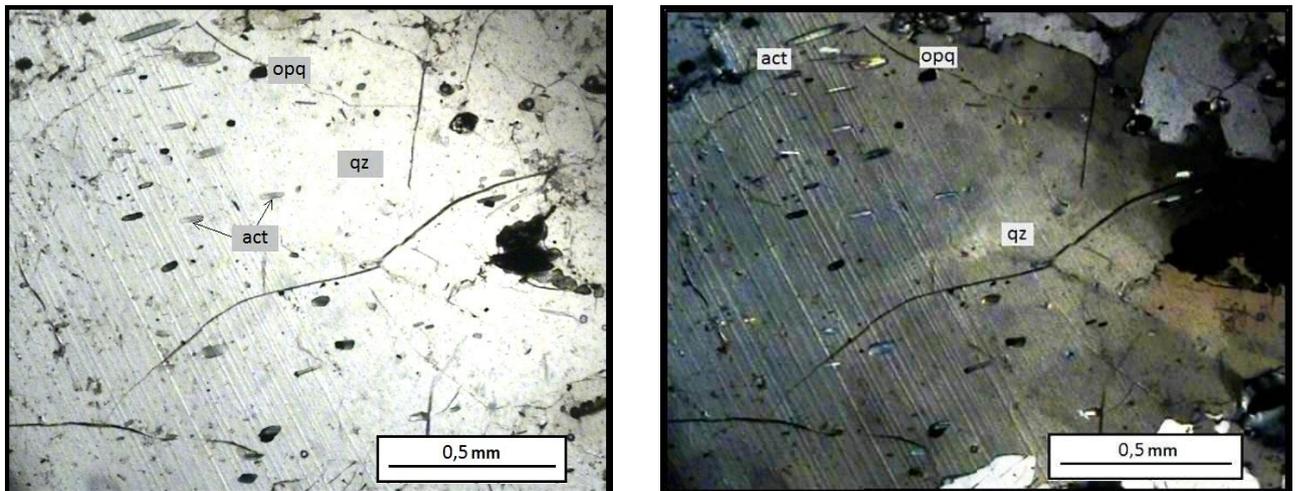


Figure 21 et 22: échantillon de veine de quartz interstratifiée, à gauche en LN et à droite en LP. act : actinote; opq : minéraux opaques; qz : quartz

➤ *Les veines sécantes*

La lame mince des veines sécantes est dominée à 90% par des grandes plages de quartz automorphes (atteignent jusqu'à 5 mm) avec ses teintes gris blanc du premier ordre en lumière polarisée et ne sont pas affectés de cassure (figure 23). Le reste est constitué par des minéraux opaques mais ceux-ci ne sont pas identifiables au microscope à lumière transmise. Cependant, on a observé que certains minéraux opaques sont cubiques (figure 24). Leur taille varie entre 0,01 mm et 0,1 mm. Ces cristaux peuvent être en effet de la pyrite ou de l'hématite.

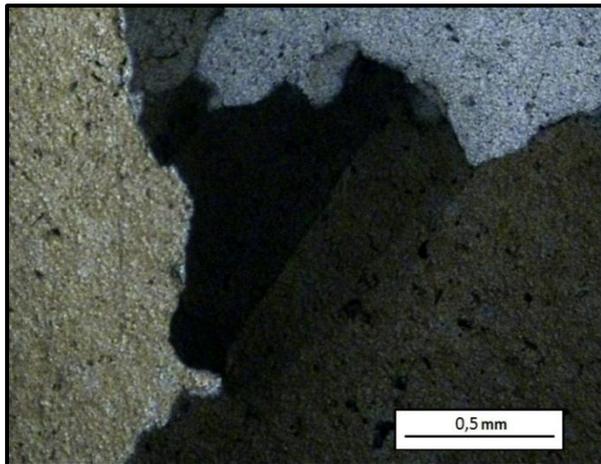


Figure 23 : échantillon de veine sécante présentant des grandes plages de quartz.

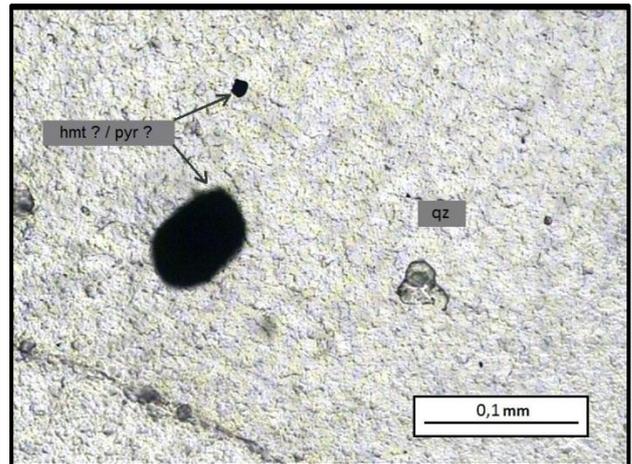


Figure 24 : échantillon de veine sécante en LN, montrant des minéraux opaques cubiques dans du quartz. hmt : hématite, pyr : pyrite ; Au : or ; qz : quartz

V.2.3. Synthèse des études microscopiques

L'observation microscopique a montré la présence de cristaux d'actinotes dans les veines de quartz concordantes aux rubanements des quartzites à oxyde de fer. Or, on ne les a pas identifiées dans la lame de quartzite. Cela suppose que les actinotes ont été transportées et déposées par un agent vecteur qui ne peut être qu'un fluide hydrothermal. Cela reconforte également l'orientation préférentielle de ces minéraux.

D'autre part, les quartzites ainsi que les veines concordantes sont affectés de fractures alors que ce n'est pas le cas pour les veines discordantes. Cela signifie qu'on est en présence de deux veines de génération différente. Les veines qui présentent des fractures se sont déposées en premier et ont subi la même déformation clastique que les quartzites ; puis viennent remplir les fractures les veines intactes plus tard après les déformations. Donc, les veines concordantes se sont mises en place en premier et les sécantes après des événements de déformations. Les veines sécantes sont probablement formées par des fluides produites lors de la mise en place des plutons granitiques aux alentours de Tongarivo.

V.3. Les résultats des traitements des données géophysiques

V.3.1. Traitement des données

A partir de la section d'acquisition, on effectue un certain nombre de traitement sur les données à l'aide du programme RES2DINV. Le processus comporte :

- une correction de la position des électrodes due au mauvais contact avec le sol, lors de l'acquisition ;
- une correction topographique : insertion des coordonnées GPS des électrodes au programme de traitement si la topographie est une pente, ce qui n'est pas le cas pour nous puisque le terrain est généralement plat de l'Est à l'Ouest ;
- une inversion des données de résistivités apparentes de la section d'acquisition : les valeurs obtenues sur le terrain sont des résistivités apparentes. Cependant, les résistivités calculées sont relativement proches des résistivités vraies des corps.

V.3.2. Les résultats du traitement des données géophysiques électriques

Comme il a déjà été énoncé au chapitre 4, trois profils géophysiques ont été réalisés sur le flanc Nord de la colline de Tongarivo, ils sont de direction Est-Ouest presque parallèles. Les coordonnées des extrémités et centres de chaque profil y ont déjà été présentées (voir tableau 9). Ces profils ont été effectués dans le but de voir l'évolution de chaque entité géologique observés sur terrain. Après traitement, les coupes géoélectriques obtenues ont été interprétées. Chaque roche a une plage de valeur de résistivité. Ainsi, la méthode d'interprétation du profil de résistivité est qu'à chaque couleur sur le layon correspond une formation géologique qui doit être en accord avec l'observation sur terrain. Le profil de chargeabilité (en dessous du profil de résistivité) informera sur le degré d'altération, la teneur en argile, la porosité...des couches.

Les entretiens avec la population locale et l'observation des échantillons excavés des puits et galeries creusés par les orpailleurs nous ont permis à l'avance d'avoir une idée sur la succession des différentes couches au droit des profils ainsi que des informations sur le niveau piézométrique. Selon la description faite par les orpailleurs, le terrain est formé par trois entités : quartzites, micaschistes et un socle dur. Voici les résultats des levés électriques obtenus avec les interprétations :

Panneau 1 : profil AB

Le profil AB (figure 25) est celui qui se trouve le plus au Sud et à l'altitude la plus élevée parmi les trois. Sa coupe de résistivité électrique permet d'identifier trois formations géologiques :

- une formation superficielle moyennement résistante (de résistivité comprise entre 1500 et 7000 Ωm), représentée en vert pâle, jaune à rouge. Sa puissance moyenne est de 2,5m. Ce sont les quartzites à oxyde de fer ;

- une formation moyennement à très conductrice (150 à 1500 Ωm). Elle est représentée en vert clair à bleu, située en-dessous de la précédente et dont le toit se trouve en général à 2,5 m de profondeur. Il s'agit ici des micaschistes. Sa puissance ne peut être déterminée mais le profil montre que celle-ci est au-delà des 12 m. Certes, le mica est un minéral testé au laboratoire comme étant un isolant électrique mais dans la nature, une roche micaschisteuse est essentiellement mais pas uniquement constituée de mica. D'une part, la présence d'autres minéraux dans la roche peut réduire sa résistivité. D'autre part, la structure en feuillet des micaschistes est favorable à la circulation de l'eau d'infiltration. Les faibles valeurs de résistivité peuvent ainsi être dues à l'humidité ;

- une couche très résistante (supérieure à 6000 Ωm) à la base Est du profil, de couleur marron à violet : c'est le socle migmatitique.

Sur le profil de chargeabilité, la partie superficielle montre une valeur relativement moyen à élevée. C'est l'effet de polarisation des électrodes dû à la présence des oxydes de fer dans les quartzites. La chargeabilité devient faible entre 2,5 et 8 m de profondeur. A ce niveau, la formation est également conductrice. Ces propriétés sont caractéristiques d'un aquifère. De plus, les orpailleurs ont indiqué que le niveau piézométrique est à environ 7m de profondeur d'après leur observation sur l'envahissement des eaux dans les galeries. Ensuite, la chargeabilité croît avec la profondeur, signifiant que les formations évoluent en roches saines.

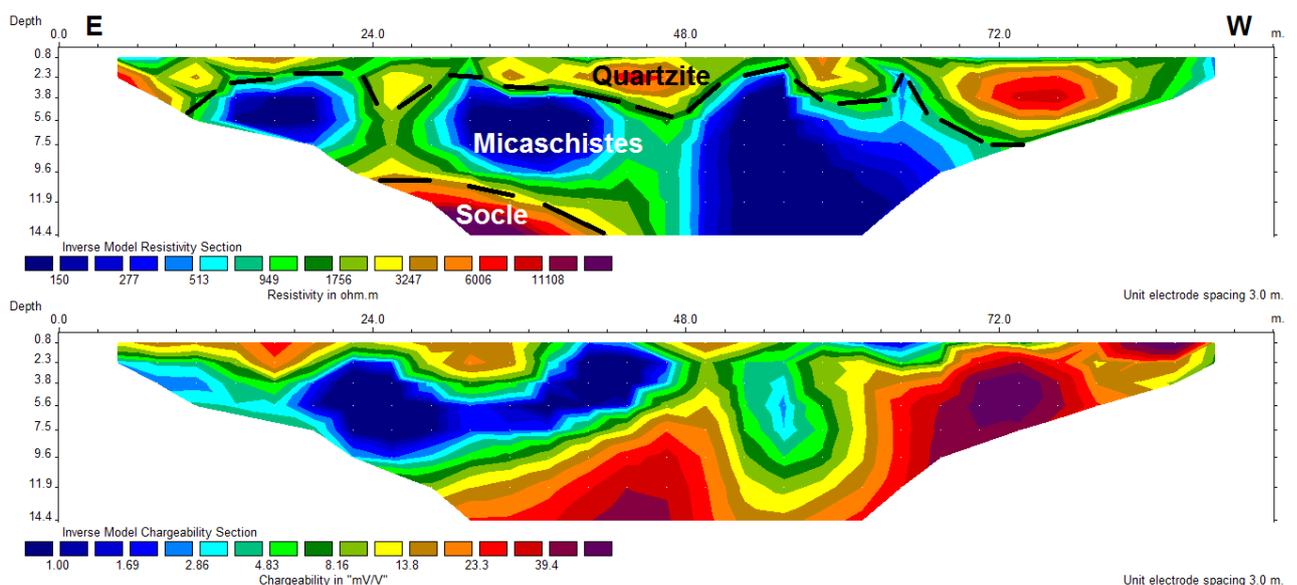


Figure 25 : Coupe géoélectrique du panneau 1 (profil AB)

Panneau 2 : profil CD

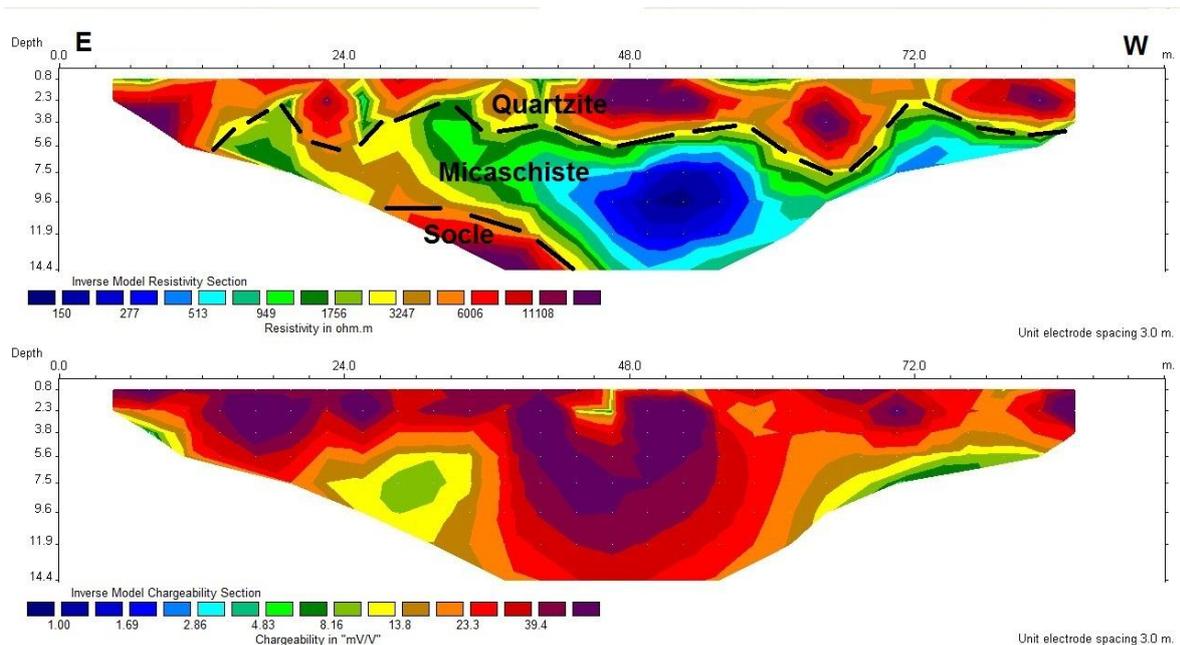


Figure 26 : Coupe géoélectrique du panneau 2 (profil CD)

Le profil CD (figure 26) montre également trois couches géologiques à savoir :

- une couche superficielle moyennement à fortement résistante (1500 à 10 000 Ωm) représentant les quartzites. Elle est dessinée en jaune à rouge sur le profil de résistivité avec une puissance moyenne de 4 m. Sa chargeabilité est également très forte à cause de la minéralisation en oxyde de fer ;
- un niveau moyennement à très conducteur (150 à 1500 Ωm) représenté en vert à bleu, recouvert par les quartzites, ce sont les micaschistes. La profondeur de son toit est très variable mais se situe en moyenne à 5 m. On remarque que sa résistivité est particulièrement faible entre $x = 42$ m et $x = 78$ m du profil signifiant la présence d'humidité ou même d'eau. Cependant, la chargeabilité correspondante est relativement élevée indiquant une forte teneur en argile. Par contre, la chargeabilité est modérée dans les parties Est et Ouest. Les micaschistes de ces zones sont donc moins argileux (moins altéré) ;
- une infime partie du socle dessinée au coin Est de la base du profil. Elle est très résistante (supérieure à 6000 Ωm) et à chargeabilité élevée indiquant que la roche est encore saine. Elle est dessinée en marron à violet sur la coupe de résistivité.

Notons la présence de zones très résistantes, de différentes formes, colorées en violet à l'intérieur des quartzites. Selon nos observations sur terrain, ces surfaces ne correspondent pas des formations géologiques mais représentent les effets du vide (résistant) des galeries creusés par les orpailleurs.

Panneau 3 : profil EF

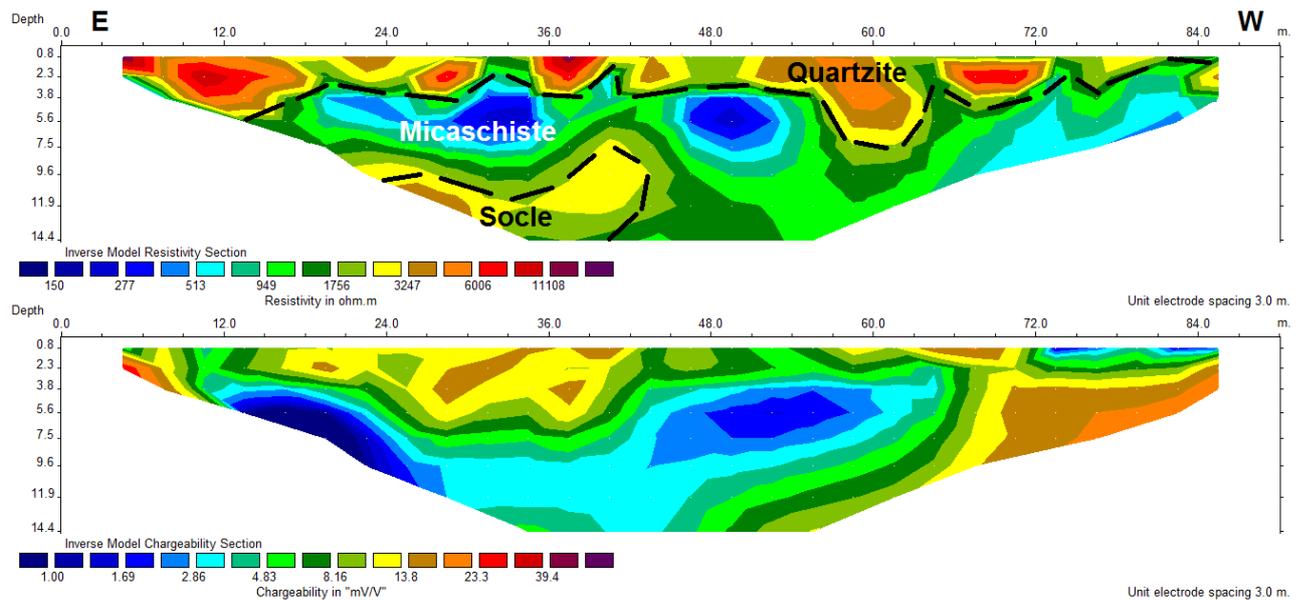


Figure 27 : Coupe géoélectrique du panneau 3 (profil EF)

Le profil EF (figure 27) est celui qui se trouve le plus au Nord. On peut déterminer ici sur la coupe trois formations géologiques :

- une couche superficielle de moyenne à haute résistivité (1500 à 7000 Ω m) et de moyenne chargeabilité, représentée en couleur vert, jaune à rouge sur le profil de résistivité. Il s'agit des quartzites avec une épaisseur moyenne de 2,5m ;
- un niveau dessiné en vert à bleu en dessous de la précédente, c'est une formation moyennement conductrice (200 à 1500 Ω m). Il apparaît à partir de 2,5 m de profondeur mais son épaisseur ne peut pas être déterminée sur le profil. Cette couche correspond aux micaschistes. Sur le profil de chargeabilité, on voit qu'à partir de $x = 12$ m à $x = 69$ m, la chargeabilité des micaschistes est moyen à faible indiquant que la formation peut renfermer une certaine quantité d'eau. Par contre, à partir de $x = 69$ m jusqu'à la fin du profil, la chargeabilité de la couche est assez élevée estimant une certaine teneur en argile ;
- un socle moyennement résistant (supérieure à 7000 Ω m) situé à la base Est du profil. La chargeabilité croît à partir de 10 m de profondeur, la roche progresse en une formation saine avec la profondeur.

V.4. Résultats d'analyse chimique et traitement des données

V.4.1. Les résultats d'analyse chimique

L'oxyde de fer est l'élément nécessaire à l'Holcim Ibity, l'analyse chimique a permis de déterminer la teneur en Fe_2O_3 des quartzites et des sols ferrugineux. Les résultats sont reportés dans le tableau 8 qui suit.

Tableau 8 : Résultats d'analyse chimique d'oxyde de fer

RESULTATS D'ANALYSE CHIMIQUE D'OXYDE DE FER : CARRIERE AMBOHIDRANANDRIANA					
				Maximum	77,60
				Moyenne	30,24
				Minimum	6,10

Puits	Type d'échantillon	X	Y	Z(m)	Fe_2O_3
P01	quartzite	473661	687657	1604	10,75
P02	sol	473600	687740	1597	28,22
P03	quartzite	473660	687564	1614	6,1
P05	quartzite	473713	687500	1636	62,09
P07	quartzite	473516	687750	1597	62,09
P08	quartzite	473429	687842	1583	64,48
P09	sol	473633	687841	1626	60,18
P10	sol	473463	687942	1581	25,07
P11	quartzite	473400	687873	1579	72,6
P12	quartzite	473487	687780	1591	60,9
P13	sol	473487	687842	1582	64,96
P15	sol	473603	687780	1583	23,88
P16	sol	473811	687586	1610	7,16
P17	sol	473574	687842	1583	9,55
P20	quartzite	473603	687657	1607	64,48
P21	sol	473830	687527	1618	14,1
P24	sol	473850	687685	1579	28,66
P25	sol	474017	687530	1601	21,49
P26	sol	474206	687537	1591	9,55
P27	sol	474356	687585	1594	9,3
P28	sol	474313	687742	1582	9,55
P29	sol	474141	687708	1577	21,97
P30	sol	473860	687861	1580	16,72
P31	sol	473747	687564	1609	26,27
P35	sol	474241	687993	1588	14,33
P36	quartzite	473632	687626	1610	21,5
P37	quartzite	473602	687688	1601	10,5
P38	sol	473574	687810	1581	9,55
P39	sol	474132	688117	1569	11,94
P42	sol	473751	688059	1564	14,32

P43	sol	473662	687949	1572	16,71
P44	sol	474233	688312	1569	10,75
P47	sol	474433	687935	1581	9,4
P55	sol	473251	687857	1562	55,52
P56	sol	473641	687445	1608	15,04
P57	sol	473450	687661	1584	13,13
P58	sol	473605	687450	1562	65,68
P59	quartzite	473601	687545	1580	77,6

V.4.2. Traitement des résultats d'analyse chimique

Pour mieux comprendre les résultats d'analyse chimique et déterminer la zone à forte potentielle en oxyde de fer, nous avons établi une carte d'isoteneur Fe_2O_3 (figure 28). Celle-ci est obtenue après traitement des données chimiques sur le logiciel Surfer 12.

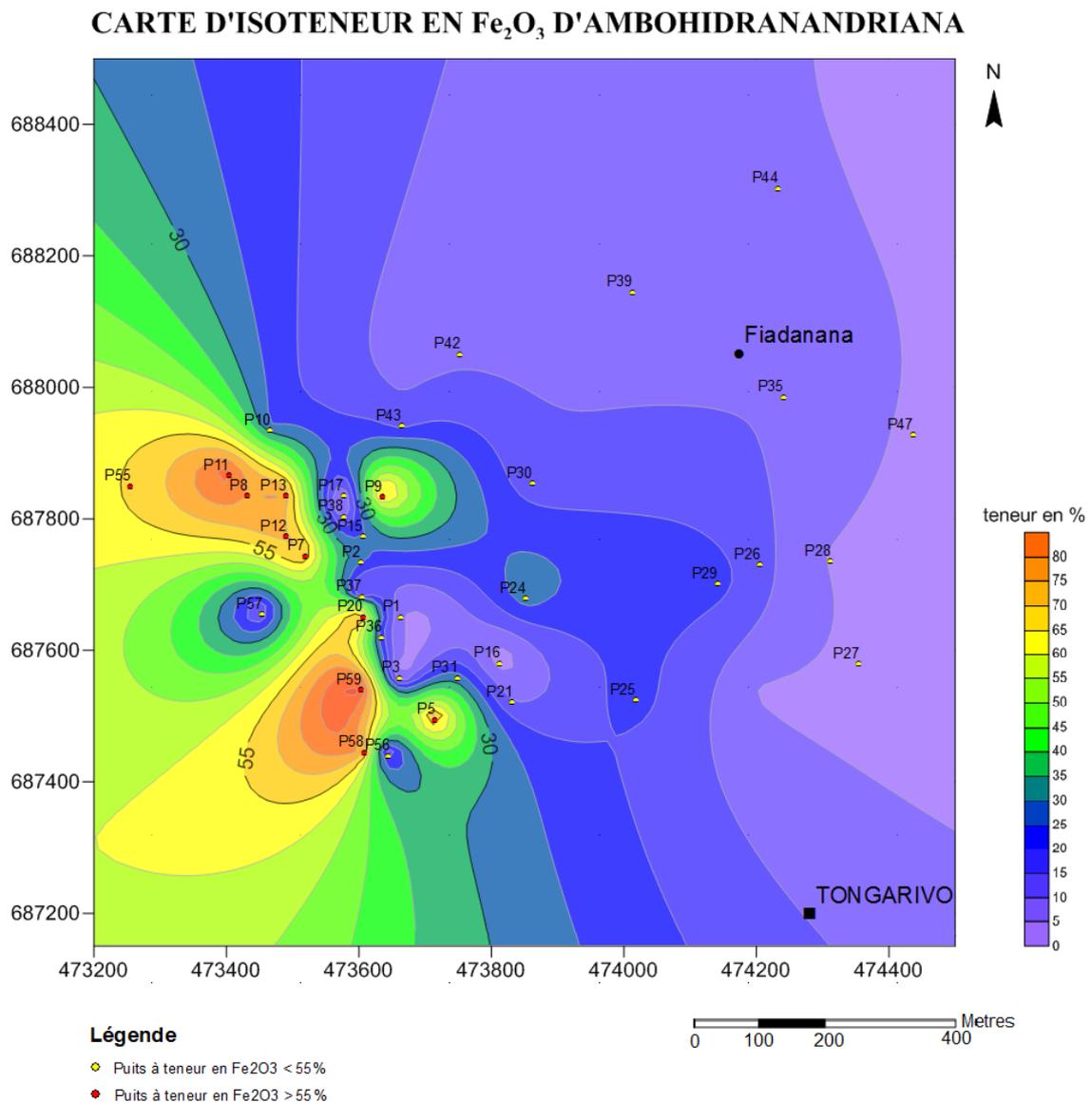


Figure 28 : carte d'isoteneur en Fe_2O_3 d'Ambohidranandriana

A première vue, la carte montre deux zones bien distinctes :

- la plus étendue représentée en bleu : une zone à teneur en Fe_2O_3 inférieure à 55% ;
- l'autre colorée en vert à orange, dans la partie sud-ouest de la carte, à teneur en Fe_2O_3 supérieure à 55%. C'est donc la zone à minerai riche.

En s'intéressant au détail, on voit que les zones à forte teneur dessinent deux surfaces bien délimitées par les deux courbes isoteneur 55. Deux autres anomalies positives sont également présentes à l'Est de chaque surface mais celles-ci ne sont que ponctuelles. En superposant les résultats d'analyse chimique à la carte géologique (figure 29), on s'aperçoit que les teneurs élevées délimitée ci-dessus correspondent à celles des quartzites à oxydes de fer et ses environs. La mesure sur ArcGIS de ces surfaces a donné 27 600 m². Cette valeur sera nécessaire dans l'évaluation du tonnage d'oxyde fer présente à Tongarivo.

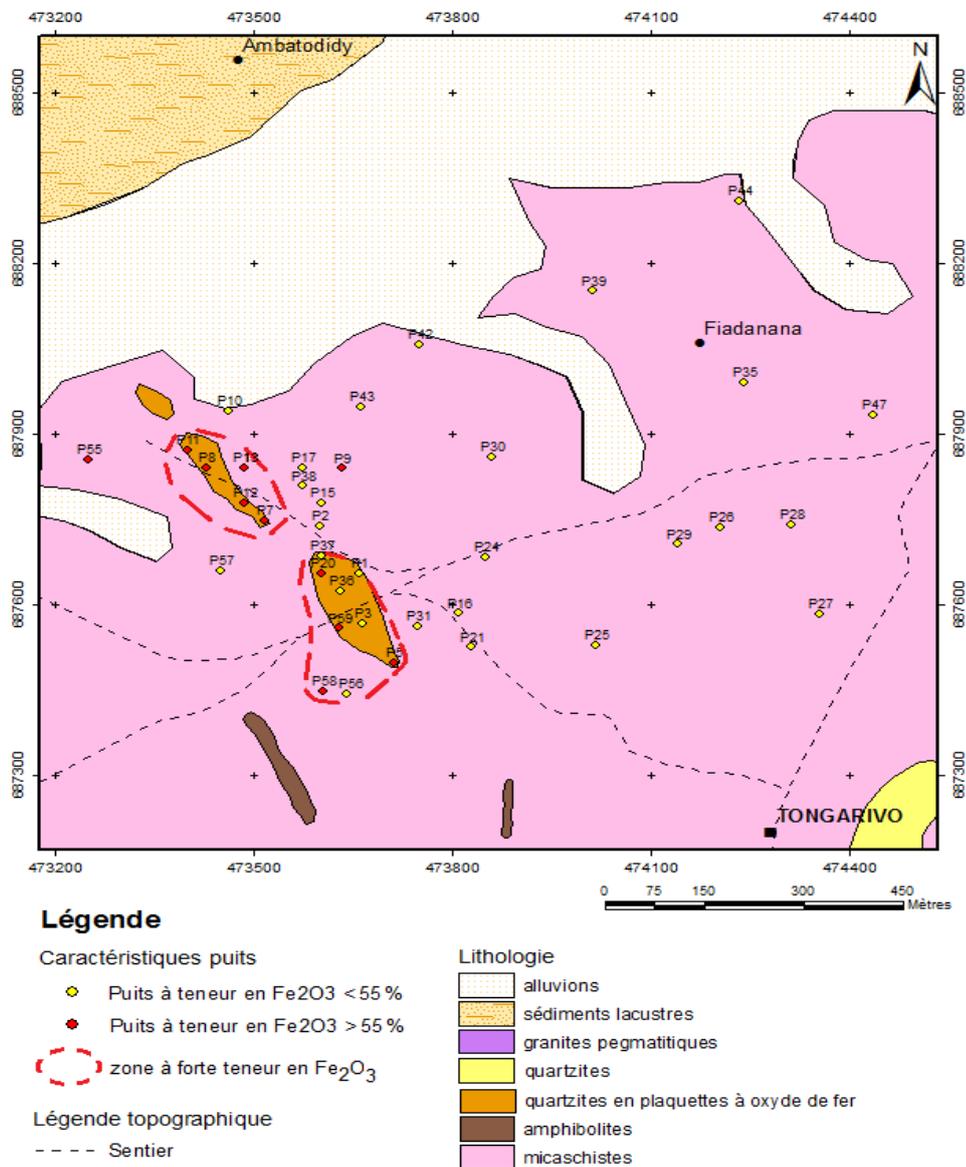


Figure 29 : Superposition des résultats d'analyse chimique à la carte géologique

CHAPITRE 6 : INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

VI.1. Interprétation des résultats

VI.1.1. Interprétation des résultats de lever géophysique électrique

En résumé, les levés de géophysiques électriques ont permis de déterminer une succession de trois formations géologiques à Tongarivo à savoir :

- ✓ Les quartzites : superficiels (2,5m de puissance en moyenne), moyennement résistants (1500 à 10000 Ωm), représentés en vert, jaune à rouge sur chaque coupe de résistivité. Les valeurs de chargeabilité de ces formations sont en général élevées. Le profil du milieu (CD) a montré qu'ils sont plus épais le long de ce profil (pouvant dépasser 4m de puissance).
- ✓ Les micaschistes : en dessous du précédent, moyennement à très conducteurs (150 à 1500 Ωm) de couleur vert à bleu sur le profil de résistivité, avec une certaine humidité voire même d'eau à quelques endroits et une certaine teneur en argile dans d'autres d'après les profils de chargeabilité ;
- ✓ Le socle migmatitique : à la base de chaque profil, en général sain, moyennement à hautement résistant par la suite (supérieure à 7000 Ωm), de couleur jaune à violet sur les coupes de résistivité.

Ces résultats nous ont permis de proposer une forme géométrique des quartzites ferrifères issue de ces profils tomographiques, représentée sur la figure 30.

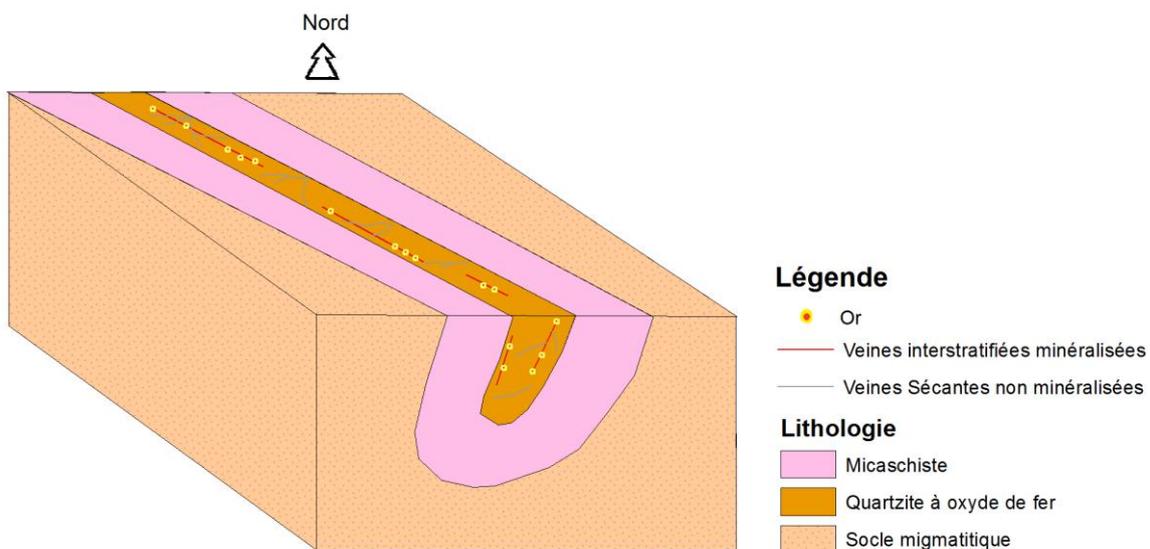


Figure 30 : Forme géométrique des quartzites issue des profils tomographiques

VI.1.2. Estimation du tonnage d'oxyde de fer de Tongarivo

En corrélant les résultats de lever géophysique et d'analyses chimiques, on peut calculer les réserves probables en oxydes de fer de Tongarivo. Les principaux paramètres utilisés sont les suivants :

- Le volume de la zone minéralisée ;
- La teneur moyenne en minerai ;
- La densité du minerai.

VI.1.1. Le tonnage du minerai

$$\text{Volume (V)} = \text{Surface (S)} \times \text{Puissance (h)}$$

$$\text{Tonnage total minerai (T)} = \text{Volume (V)} \times \text{densité (d)}$$

La surface (S) de la zone minéralisée est mesurée sur ArcGIS tandis que la puissance (h) est donnée par les panneaux électriques. Le résultat de l'estimation est présenté dans le tableau 09 :

Tableau 9 : Résultat de calcul du volume de minerai d'oxydes de fer

Surface (m ²)	27 600
Puissance (m)	2,5
Volume (m ³)	69 000
Densité	3,1
Tonnage total minerai (tonnes)	213 900

VI.1.2. Réserves probables en oxyde de fer

$$\text{Réserves probables (Rp)} = \frac{\text{Tonnage total minerai (T)} \times \text{teneur moyenne}}{100}$$

La teneur moyenne en oxyde de fer de la zone potentielle de Tongarivo, délimitée sur la figure 24, est donnée par le tableau 10. Sa valeur est de 66,6 %. Par conséquent :

$$\text{Rp} = \frac{213\,900 \times 66,6}{100}$$

$$\boxed{\text{Rp} = 142\,480 \text{ tonnes}}$$

L'Holcim Ibity nécessite de l'oxyde de fer qu'il utilise en tant qu'ajout dans la fabrication du ciment. Son besoin est de l'ordre de 1240 tonnes par an (selon une communication orale avec un responsable d'Holcim). La réserve calculée de 142 480 tonnes est donc largement suffisante pour plusieurs années. Par contre, il est loin d'être envisageable

de l'exploiter comme minerai de fer parce qu'un minerai de fer doit atteindre les millions de tonnes pour pouvoir être considéré comme gisement.

Tableau 10: Teneur moyenne en oxyde de fer de la zone potentielle de Tongarivo

PUITS	X (m)	Y (m)	teneur Fe₂O₃ (%)
P7	473516	687750	62,09
P8	473429	687842	64,48
P11	473400	687873	72,6
P12	473487	687780	60,9
P13	473487	687842	64,96
P20	473603	687657	64,48
P58	473335,145	687864,961	65,68
P59	473505,249	687588,979	77,6
Moyenne			66,60

VI.2. Discussions

IV.2.1. Modèles de mise en place de la minéralisation d'oxyde de fer et or de Tongarivo-Ambohidranandriana

IV.2.1.1. La minéralisation d'oxyde de fer de Tongarivo

Le contexte géologique est un des critères de base dans l'étude de la mise en place d'une minéralisation. La feuille 049 où se situe notre zone d'étude n'a pas été sujet d'une cartographie détaillée à l'échelle 1 : 100 000 à travers le projet PGRM 2012 mais à l'échelle de 1/ 500 000 où elle appartient à la zone B. Nous avons quand même essayé de cadrer géologiquement notre zone d'étude.

Sur la nouvelle carte géologique du PGRM 2012 au millionième, les formations de la Commune d'Ambohidranandriana appartiennent à la suite de Betsiboka qui correspond à des orthogneiss migmatitiques et non migmatitiques de composition monzonitique à granitique. Certes, les observations sur terrain ont montré que la zone d'étude est dominée par des migmatites. Mais il n'est pas mentionné sur la notice explicative qu'il est possible de rencontrer des niveaux de quartzite, d'amphibolites, de micaschistes et de graphite, caractéristiques la géologie d'Ambohidranandriana, dans la suite de Betsiboka.

Par contre, sur la carte géologique feuille N°08-ANTANANARIVO au 1/500 000 du PGRM 2008, les couches géologiques de notre zone d'étude y sont cartographiées comme appartenant au Groupe de Vondrozo. Ce groupe est formé d'une séquence hétérogène de gneiss migmatitiques avec un fort rubanement migmatitique compositionnel (métatexite), des

lentilles et des amas d'amphibolite, de schistes plus ou moins graphiteux et de quartzites à magnétite. Ces descriptions correspondent bien à nos observations de terrain. Ce qui nous permet de classer lithologiquement les formations géologiques d'Ambohidranandriana comme appartenant au groupe de Vondrozo.

Cette mise en contexte a été nécessaire pour la suite de notre interprétation. En effet, les quartzites à magnétite du groupe de Vondrozo ont été interprétés par Bernard Moine en tant que BIF (Banded Iron Formation) [20]. Ainsi, cela nous a menés à établir des comparaisons entre les BIF et les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo. Nous avons abouti à des résultats qui réconfortent l'hypothèse que les quartzites de Tongarivo sont possiblement des BIF par le fait qu'ils présentent des similarités avec d'autres BIF connus dans le monde.

a. Similarités des quartzites à oxyde de fer de Tongarivo avec les BIF

D'après nos observations, les quartzites à oxydes de fer de Tongarivo présentent des points communs à un gisement de type BIF connu en Mauritanie. Il s'agit du BIF de la Kedia d'Ijil, l'un de principaux gisements de fer « Hématite » naturellement riche, dans la province ferrifère de Tiris, en République Islamique de Mauritanie [8].

❖ Les concentrations naturelles d'hématite de la Kedia d'Ijil sont encaissés dans des formations quartzo-ferrugineuses qui correspondent lithologiquement à des roches formées d'alternances de lits, d'épaisseur millimétriques en général, de silice pure et d'un mélange de silice et d'hématite. Le rubanement est très bien marqué et donne à la roche son aspect macroscopique typique, aspect typique des BIF (Photo 25). Visiblement, les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo présentent ce même aspect lité caractéristique (Photo 26).

❖ Toutes les concentrations d'hématite d'Ijil présentent un certain nombre de caractéristiques géologiques communes, qui permettent de les classer en deux grands types : gisements de type Rocheux et gisements de type Plaquettes. Ce sont ces derniers qui nous intéressent par le fait que leur aspect constitue un autre point commun aux quartzites de Tongarivo : le débit en plaquettes. Les gisements de la Kedia d'Ijil se présentent suivant un empilement de plaquettes, non cohésives, friables et même parfois réduites en poudre (Photo 27). Les quartzites de Tongarivo présentent les mêmes apparences (Photo 28).



Photo 25 : Echantillon de BIF provenant du gisement de F'Derik, KEDIA D'IJIL (PROVINCE DE TIRIS-MAURITANIE), qui montre l'alternance millimétrique de lits d'hématite (sombres) et de lits siliceux (clairs)

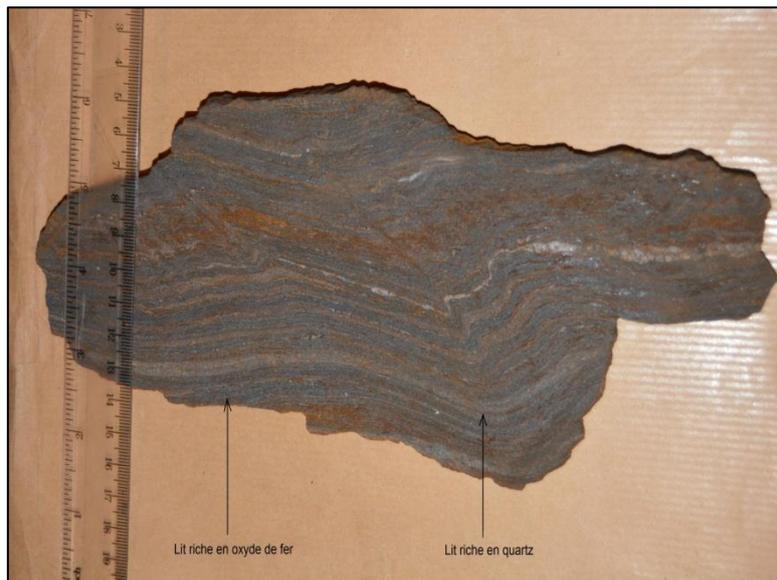


Photo 26 : Echantillon de quartzite à oxyde de fer de Tongarivo qui montre son aspect rubané marqué par l'alternance de couches riche en oxyde fer et de couches riches en quartz



Photo 27 : Affleurement de minerai en plaquette, gisement de F'Derik, Kedia d'Ijil



Photo 28 : Affleurement de quartzites à oxyde de fer de Tongarivo en affleurement

Puisque les quartzites de Tongarivo appartiennent au groupe de Vondrozo, l'âge de son dépôt se situe donc entre 2,5 et 2,8 Ga, âge des formations du groupe de Vondrozo. Ses minéraux ferrifères sont des oxydes avec une teneur moyenne de 66,60%. La présence de dolomie dans la zone d'étude témoigne du passage de la mer. D'autre part, notre zone d'étude se situe non loin à proximité d'Ibity (environ 100 km à vol d'oiseau), qui est une formation épicontinentale. En somme, la combinaison de ces informations permet de classer les

quartzites de Tongarivo aux BIF type Supérieur qui sont d'âge 2,7 et 1,8 Ga, associé non pas à des ceintures de roches vertes mais au talus continental des cratons et à faciès oxydé.

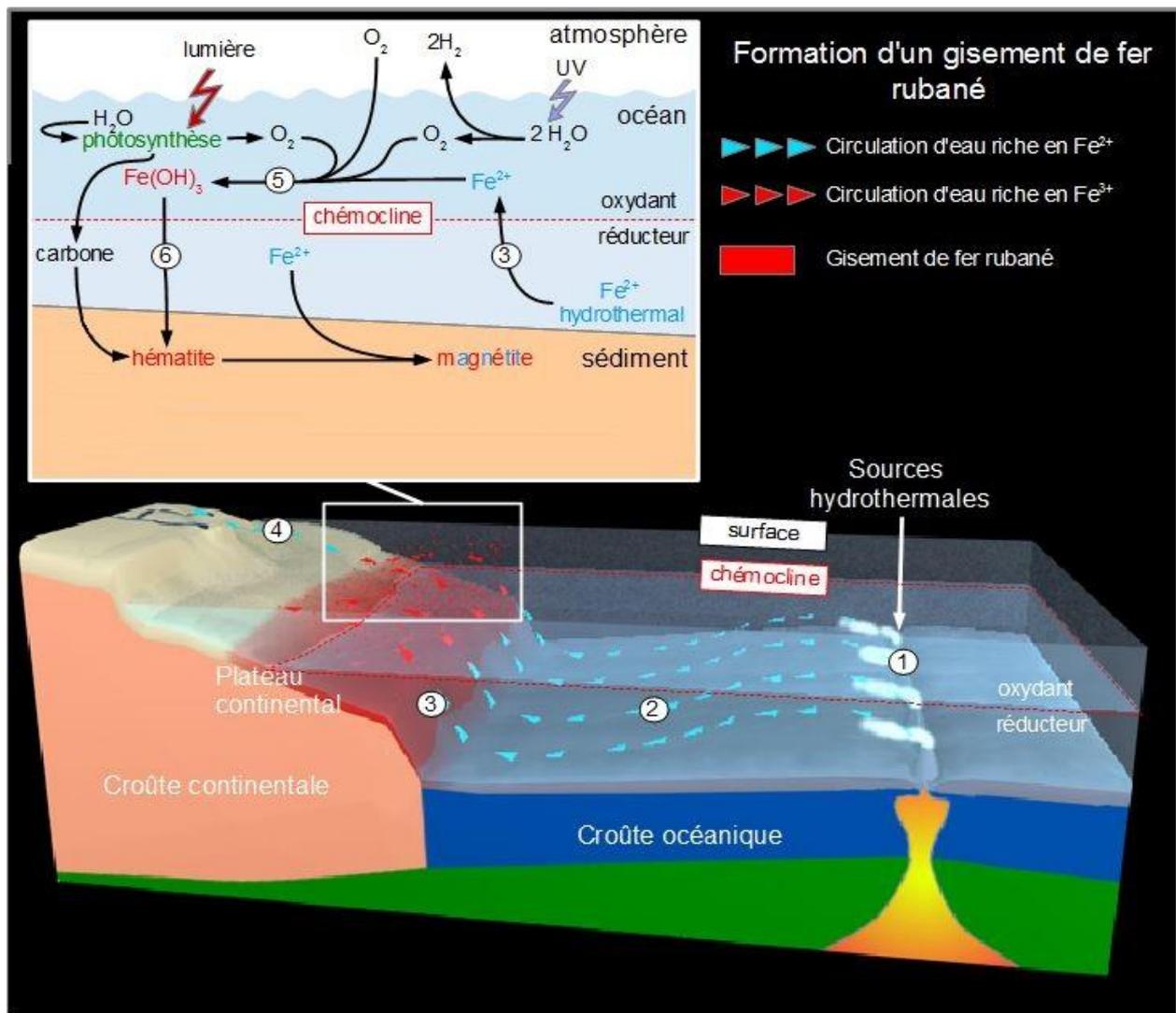
b. Modèle de mise en place des quartzites à oxyde de fer de Tongarivo [25] [28]

Les paragraphes précédents nous ont permis d'assimiler les quartzites de Tongarivo au type BIF. Il est aujourd'hui reconnu que les BIF sont en fait des gîtes sédimentaires marins qui se forment par des processus géochimiques lors de la sédimentation dans des bassins. Selon Jébrak et Marcoux (2008), les caractéristiques sédimentaires de ces formations portent à croire que les BIF ont été formés dans une période où l'atmosphère contenait peu d'oxygène libre.

Après synthèse de tous les observations et résultats d'analyses, nous sommes parvenus à un modèle de processus de mise en place des quartzites ferrifères rubanés de Tongarivo.

Le fer était produit (1) au niveau des sources hydrothermales. Les bassins océaniques stratifiés profonds anoxiques étaient alors riches en fer et en silice. A l'état réduit, Fe^{2+} , il était soluble dans les eaux réductrices des fonds océaniques. Le fer circulait (2) grâce aux courants des couches profondes des océans du Précambrien et probablement capable de voyager sur de grandes distances. Des upwellings et les courants de fond (3) le faisaient remonter à la surface vers les marges continentales. Il traversait ensuite la chémocline séparant les eaux réductrices profondes des eaux oxydantes de surface. Le mélange des fluides avec de l'eau plus oxygénée à la surface aurait conduit à l'oxydation du fer et à la précipitation des oxydes de fer et des silicates. Le fer s'oxydait (5) alors à l'état de Fe^{3+} et précipitait (6) sous forme d'hématite qui sédimentait sur le fond au niveau du plateau continental. L'oxygène des eaux de surface provenait de la dissociation de l'eau sous l'effet du rayonnement ultraviolet, de l'atmosphère et de la photosynthèse. Une partie du fer du gisement venait de l'érosion (4) des continents.

Pour ce modèle, les gisements de fer rubané sont donc la résultante de phénomènes complexes d'oxydoréduction qui se sont déroulés dans un océan stratifié dont les couches supérieures étaient oxydantes et les couches profondes réductrices. La fin de la déposition des BIF a été attribuée à une hausse de la concentration d'oxygène dans l'atmosphère.



IV.2.1.2. Modèle de mise en place de l'or de Tongarivo

L'or de Tongarivo est une minéralisation primaire contenue dans des veines de quartz encaissées dans les quartzites à oxyde de fer. L'or y est extrait à partir des veines interstratifiées dans les quartzites.

Besairie, dans son étude sur la géologie économique de la préfecture d'Antsirabe, a mentionné qu'à l'échelle régionale, l'or se trouve localisé dans les zones micaschisteuses et gneissiques au voisinage du front des migmatites tel le cas de notre minéralisation. L'or s'y rencontre soit à l'état d'élément accessoire dans la roche, soit à l'état disséminé dans les veines quartzieuses interstratifiées soit en alluvions et éluvions dérivant des deux types précités. Selon sa description pour le premier type, certains gneiss et micaschistes renferment de l'or parfois visible à l'œil mais le plus souvent disséminé en grains microscopiques inclus

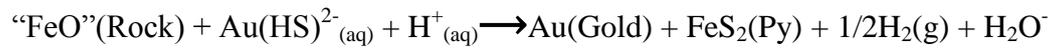
dans les divers minéraux constituant la roche : quartz, feldspath, mica, grenat... L'or peut donc apparaître comme constituant des gneiss et micaschistes de notre zone d'étude au même titre que les autres minéraux.

Par ailleurs, il est également possible que l'or soit déjà présent de façon disséminée dans la formation ferrifère depuis même la formation de celle-ci. En effet, il a été véhiculé de la même manière que le transport du fer et de la silice d'origine hydrothermale vers les continents lors de la formation des roches ferrifères rubanées tel que l'on a décrit dans le paragraphe IV.2.1.1.b ci-dessus. Dans ce cas, l'or est donc d'origine magmatique et que la minéralisation est antérieure à la formation des filons. Sa concentration dans les veines aurait été le fruit d'un autre processus comme une remobilisation.

Pendant l'Orogenèse Panafricaine (500 - 550 Ma) s'est manifesté une très forte remobilisation métamorphique [7]. Selon Olivier Cardon, les roches soumises à un métamorphisme de faible intensité type schiste vert peuvent libérer une grande quantité de fluide susceptible de mobiliser l'or qu'elles contiennent. Des fluides hydrothermaux circulaient alors remobilisant et lessivant les ions Au^{4+} disséminés les gneiss et micaschistes puis les déposant dans des pièges où les conditions de précipitation sont convenables. Les plans de stratification et les divers linéaments constituent des zones de moindre résistance qui ont livré passage au fluide minéralisateur.

La précipitation de l'or à partir de fluides hydrothermaux minéralisés est en réponse à des changements de conditions physico-chimiques du fluide sur le lieu de piégeage. Ces changements spécifiques de la chimie du fluide minéralisateur peuvent résulter de divers facteurs (Mikucki, 1998) : 1) un refroidissement des fluides adiabatique et conductif, 2) une interaction avec les roches encaissantes, 3) une séparation de phase en réponse à une décompression synchrone à la remontée ou à l'ébullition du fluide ou 4) le mélange du fluide minéralisateur avec un autre fluide. Selon le même auteur, le mécanisme efficace de précipitation de l'or dans une roche contenant abondamment du fer est la sulfurisation de la roche hôte. La réaction entre un fluide minéralisé riche en soufre avec un encaissant ferrifère provoque la formation de sulfures, ce qui abaisse la concentration en H_2S du fluide et diminue de façon drastique la solubilité de l'or conduisant à sa précipitation. Ce mécanisme est encore plus efficace si la roche est très réactive, par exemple si les minéraux ferrifères sont des oxydes. Le mécanisme de sulfuration, résultat de l'interaction du fluide avec les roches encaissantes, est donc applicable pour notre cas parce que d'une part, les veines de quartz minéralisés de Tongarivo présentent un aspect carié supposant qu'ils sont à l'origine occupés par des sulfures tels que la pyrite mais qui par altération météorique se sont oxydés. D'autre

part, les veines sont encaissées dans des quartzites ferrifères. Le processus est résumé par la réaction suivante, établit par Mikucki, 1998 [21] :



Ce mécanisme de précipitation de l'or est restreint aux formations de fer comme les BIF, aux amphibolites, aux roches ultramafiques et aux intrusions intermédiaires. L'or de Tongarivo appartient au type de minéralisation aurifère stratoïde dans des formations de fer.

CONCLUSION GENERALE

Les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo dans la Commune Rurale d'Ambohidranandriana n'attiraient en général l'attention que par le fait qu'ils constituent l'encaissant d'une minéralisation aurifère actuellement sujet d'exploitation artisanale. Mais à travers ce Mémoire, les observations sur terrain et différentes investigations ont montré que ces quartzites présentent des caractéristiques intéressantes.

Des travaux d'échantillonnages dans des puits de reconnaissance ont fait l'objet d'une analyse chimique afin de déterminer le potentiel en oxyde de fer de Tongarivo. Il en est sorti après traitement des résultats que les quartzites ont une teneur en oxyde de fer assez importante avec une moyenne de 66,6 %. Des levés géophysiques électriques ont donné une épaisseur moyenne de 2,5 m pour les quartzites. Ces résultats ont permis d'évaluer la réserve probable en oxyde de fer de Tongarivo qui vaut environ 140 000 tonnes. Certes ce tonnage est très faible en termes d'exploitation comme minerai de fer. Même les gisements de minerai de fer considérés de petite taille à Madagascar ont un tonnage supérieur à un million de tonnes pour être considéré comme exploitable à l'échelle industrielle de sidérurgie, ce qui est très loin d'être le cas pour notre minéralisation. Mais pour d'autres utilisations comme ajout pour la fabrication de ciment par exemple, tel le cas de l'Holcim Ibity, ces quartzites constituent une réserve intéressante voire même importante en termes d'oxyde de fer.

D'autre part, les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo présentent un aspect lité très caractéristique des BIF. Ses comparaisons avec les BIF de la Kédia D'Idjil ont évoqué des points communs : le rubanement, marqué par l'alternance de lits sombres riches en fer et de lits clairs riches en quartz, et le débit en fines plaquettes non cohésives. Avec la présence de roche carbonatée dans la zone d'étude et la proximité d'Ibity, nous sommes parvenus à assimiler les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo au BIF type Supérieur caractérisé par un faciès oxydé et formé aux marges des plateaux continentaux. Ils auraient été mis en place par précipitation chimique d'ion ferreux d'origine hydrothermale sur un plateau épicontinental. La précipitation se fait par réaction d'oxydo-réduction.

Pour la minéralisation aurifère, l'or est porté par les veines de quartz interstratifiées. Les observations sur lame mince d'un échantillon des veines interstratifiées ont montré la présence de cristaux d'actinotes bien cristallisés qui n'ont pas été trouvés dans l'échantillon des quartzites à oxyde de fer. Cela suggère que les actinotes sont d'origine extérieure permettant d'interpréter qu'un fluide minéralisateur transportant l'actinote et l'or a traversé

les quartzites. L'interaction de ce fluide avec l'encaissant ferrifère a précipité des sulfures et de l'or par le processus de sulfuration de Mikucki mais l'effet de l'altération météorique a dissout ces derniers attribuant aux veines leur aspect carié. La minéralisation est donc contrôlée par la lithologie ferrifère. Tel est le lien entre la minéralisation aurifère et ferrifère. Les linéaments et plans de stratification ont également joué un rôle important en servant de voie de circulation au fluide minéralisateur.

Cette étude n'apporte qu'une infime partie sur la connaissance de la minéralisation aurifère et ferrifère de Tongarivo. D'une part, l'extension de ces minéralisations vers le Sud n'a pas pu être étudiée par le fait que nous n'avons pas eu l'autorisation de travailler dans les carrés miniers d'un ressortissant étranger où on reconnaît également une exploitation de l'or encaissé dans les quartzites. D'autre part, ce mémoire est loin de résoudre les problèmes de genèse des minéralisations de Tongarivo. Nous nous sommes ainsi contentés de la comparaison de l'aspect visuel pour caractériser les quartzites, ce qui est loin d'être suffisant. Nous recommandons par conséquent une analyse chimique et pétrographique (sur lumière réfléchie) plus détaillée si l'on souhaite caractériser au mieux la mise en place de ces minéralisations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Alsac C., Noizet G. et Razafimanantsoa, 1963 : *Etude géologique de la feuille Antanifotsy 049*. Dans le Rapport annuel du service géologique pour 1963, H. Besairie. Service géologique. pp 169-170
- [2]. Andriharizafy, R., 2008 : *Etude des zones favorables en minéralisation aurifère et en émeraude dans la Commune Rurale d'Androrangavola, District D'Ifanadiana, Région Vatovavy Fitovinany*. Mémoire de Maitrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée - Option Mines et Environnement. Université d'Antananarivo. 59 pages.
- [3]. Arndt N., Ganino C., 2010 : *Ressources minérales : Nature, origine et exploitation*. Cours et exercices corrigés. éd DUNOD. Paris, 173 pages.
- [4]. Beaudoin, G., 2006 : *Manuel de gîtologie et métallogénie*. Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval Québec, 117 pages
- [5]. Besairie, H., 1962 : *Géologie économique de la préfecture d'Antsirabe*. Service géologique. pp 26-40
- [6]. Brahim, A. 2010 : *Caractérisation et choix d'un schéma de traitement du minerai cuivre-fer de Douamis (Ouenza)*. Mémoire de MAGISTER en MINES. Faculté des sciences de la terre, Département des Mines. Université Badji Mokhtar Annaba. 136 pages.
- [7]. BRGM, 1985 : *Plan Directeur d'Actions pour la mise en valeur des ressources du sol et du sous-sol de Madagascar*. Première phase – première partie. Service Géologique d'Antananarivo. 584 pages
- [8]. Elwaled, O. E. 2009 : *Etude d'un gisement type banded iron formations : gisement de F'Derik, Kedia D'Ijil (Province de Tiris-Mauritanie)*. Mémoire de Master Spécialisé - Ressources Minérales et Énergétiques : Genèse et Mise en Valeur. Université Moulay Ismail. 64 pages
- [9]. Encyclopédie Encarta 2010
- [10]. Encyclopédie Larousse
- [11]. Faure, S., 2003 : *Les gisements Protérozoïques d'oxydes de fer polymétalliques : cible d'exploration au Québec*. Rapport, projet Consorem 2000-4. 61 pages

- [12]. Guigues, J., 1952 : *Etude géologique des feuilles d'Antsirabe et d'Ambatolampy*. Travaux des Bureaux Géologiques n° 28. Service géologique de Madagascar, p. 45-64.
- [13]. Harcouet V. 2005 : *Modélisations thermiques de gisements orogéniques mésothermaux : application au Ghana*. Geophysics. Institut de physique du globe de paris - IPGP, 2005. French. < tel-00010834 >. 268 pages.
- [14]. Mamitiananomenjanahary, A.D. 2014 : *Evaluation du potentiel géothermique du prospect de Ranomafana-Betafo*. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Géologue. ESPA, Université d'Antananarivo. 111 pages.
- [15]. Rakotoniaina, H. 2005 : *Contribution à l'étude des substances utiles dans la Commune Rurale d'Ambohitsimanova*. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Géologue. ESPA, Université d'Antananarivo. 73 pages
- [16]. Rasamimanana, V., 2014, *Approche sur la mise en place du gisement d'or d'Antandrokazo, Miarinavaratra- Fandriana*. Mémoire d'Ingénieur Géologue. ESPA, Université d'Antananarivo. 97 pages.
- [17]. Rasetraharison, M., 2010 : *Monographie des gisements de fer de Madagascar*. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies - Option Génie Minéral. ESPA, Université d'Antananarivo. 109 pages
- [18]. Rasoanimanana, R., 2010 : *Les formations superficielles du bassin d'Antsirabe (Hautes Terres Centrales de Madagascar : nature dynamique et hydrogéomorphologique*. Doctorat de Géographie - Spécialité : Géomorphologie. Faculté des Lettres et Sciences Humaines Departement Geographie. Université d'Antananarivo 219 pages
- [19]. Razefania, L. N., 2001 : *Prospection géochimique de l'or primaire du secteur Nord-Ouest Ambondrona, région de Tsinjoarivo – Ambatolampy*. Mémoire d'Ingénieur Géologue. ESPA, Université d'Antananarivo. 91 pages.
- [20]. PGRM, 2012 : *Cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000 - Notice explicative*. Bureau du Projet de Gouvernance des Ressources Minérales de Madagascar. 263 pages.
- [21]. Stephen, J. P., 2014 : *Models and Methods for Metal Deposition from Hydrothermal Fluids*. Memorial University. Power Point. 30 slides.

[22]. Thiébaud, L., 1934 : *Recherche et étude économique des gîtes métallifères*. Librairie polytechnique. CH. BERANGER. Pp 369-385.

[23]. UPDR, 2003 : *Monographie de la région de Vakinankaratra*. Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. 118 pages.

WEBOGRAPHIE

[24]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Gisement_de_fer_ruban%C3%A9

[25]. <http://www.evolution-biologique.org/histoire-de-la-vie/monde-bacterien/gisements-de-fer-rubane.html>

[26]. <http://www.fossiliraptor.be/fer.htm>

[27]. <http://www.géowiki.com>

[28]. http://wiki.ggl.ulaval.ca/metallogenica/wiki/Formationde_fer_rubanees_de_type_Superieur_BIF/1712/edit/?tx_drwiki_pi1%5Bsection%5D=2.

ANNEXES

Annexe I : les principaux minerais de fer [22] [26]

Minerai	Teneur en fer	Couleur	Caractéristiques
<i>Les oxydes</i>			
Magnétite Fe ₃ O ₄	72,36% fer 27,64 % oxygène	Gris foncé à noir	Roche très magnétique. Elle a pris de plus en plus d'importance avec le développement des techniques de concentration magnétique et l'utilisation accrue de produits de haute qualité.
Hématite Fe ₂ O ₃	69,94% fer 30,06% oxygène	Gris acier si cristallisé mais rouge vif à l'état pulvérulent ou amorphe	Appelée aussi « minerai naturel », c'est l'un des principaux minerais de fer et la forme de roche la plus répandue à la surface de la terre. C'est également le composant le plus important des minéraux de fer traités dans l'industrie sidérurgique.
Limonite (ou Hématite brune) FeO(OH).n H ₂ O	62,85% fer 27,01% oxygène 10,14% eau	Jaune ou marron, parfois noir	A la fois oxyde et hydroxyde de fer, les limonites sont également une source importante de minerais à travers le monde. Elles se présentent souvent avec une forme rognonneuse, botryoïde ou stalactiforme. La goethite qui est une sorte de limonite se rencontre souvent en association avec de l'hématite.
Ilménite FeTiO ₃	36,80% fer 31,57% titane 31,63% oxygène	Noir	Elle est généralement exploitée pour le titane qu'elle contient. Le minerai de fer peut être alors extrait en tant que sous-produit au cours du traitement de la roche. Cette roche n'est pas magnétique.
<i>Les carbonates</i>			
Sidérite ou sidérose FeCO ₃	48,20% fer 37,99% CO ₂ 13,81% oxygène	Blanc à gris vert	Les sidérites contiennent en général une proportion assez variable de calcium, magnésium ou manganèse, fréquemment associée à la pyrite.
<i>Les sulfures</i>			
pyrite FeS ₂	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivré	Connue sous le nom d'or des fous du fait de sa grande ressemblance avec l'or. Elle est la roche contenant du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer qu'elle contient mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est le sous-produit le plus communément extrait.
pyrrhotite FeS ₂	60,4% fer 39,6% soufre	Bronze	Le magnétisme des phases hexagonales en fait des cibles pour le repérage par géophysique des amas sulfurés
marcassite FeS ₂	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivré	Très proche de la pyrite, de même composition chimique mais de forme cristalline différente

Annexe II : Les principaux minéraux aurifères (Source : Plan minéral-Supplément au Plan Quinquennal 1964-1968)

Nom	Formule	Système cristallin	Dureté	Densité	% Au	Couleur
Or natif	Au	Cubique	2,5 à 3	19,3	100	Jaune d'or
Electrum	Au Ag	Cubique	2,5 à 3	12,5 à 15,5	55 à 80	Jaune pâle, variant suivant la teneur en Ag
Maldonite	Au ₂ Bi	Cubique	1,5 à 2	15,46	65	Blanc argent
Calavérite	(Au,Ag)Te ₂	Triclinique	2,5	9 à 9,5	39,5	Jaune bronze
Krennerite	(Au,Ag)Te ₂	Orthorhombique	2,5	8,35		Blanc jaunâtre
Sylvanite	(Au,Ag)Te ₄	Triclinique	1,5 à 2,5	7,9 à 8,3	24,5	Gris acier
Petzite	(Au,Ag) ₂ Te	Orthorhombique	2,5 à 3	8,7 à 9	18 - 25	Gris à noir
Magyagite	Au ₂ Pb ₁₄ Sb ₃ Te ₇ S ₁₇	Orthorhombique				
Aurostibite	AuSb ₂					

Annexe III : Les matériels de terrain

Voici la liste des matériels utilisés :

- Un carnet de terrain, des stylos, des marqueurs pour la prise de note et la numérotation des échantillons ;
- Un GPS pour la localisation des points de prélèvements des échantillons des formations rencontrées ;
- Un marteau de géologue ;
- Une boussole pour la mesure des directions et pendages des couches, des foliations ou schistosités, des fractures et diaclases... ;
- Des sacs à échantillon ;
- Des bêches
- Des barres à mine nécessaire pour le fonçage des formations dures des puits de reconnaissance ;
- Un double décimètre pour toute mesure de distance.

Annexe IV : Confection de lames minces

- préparation du sucre : elle consiste à obtenir à partir de l'échantillon brut une forme rectangulaire, appelée sucre, conforme aux dimensions des verres de lame par sciage électrique ;
- polissage de la face à coller du sucre ;
- dépolissage du verre pour que celui-ci adhère plus au collage ;
- séchage du verre et du sucre à la plaque chauffante ;
- préparation de la colle puis collage du sucre au verre ;
- assèchement de l'ensemble à la plaque chauffante pendant 12 heures à 75°C ;
- arasage de la lame ;
- polissage de lame jusqu'à obtenir une épaisseur de 3 μm .

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
Sommaire	iii
Signification des acronymes et abréviations	iv
Glossaire.....	v
Liste des figures	vi
Liste des photos.....	vii
Liste des tableaux	viii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : GENERALITES	2
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE	3
I.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, MORPHOLOGIQUE ET ECONOMIQUE DE LA ZONE D’ETUDE.....	3
I.1.1. Géographie administrative	3
I.1.2. Géographie physique	3
I.1.2.1. Relief [23]	3
I.1.2.2. Hydrographie [23].....	5
I.1.2.3. Climat et pluviométrie [23].....	6
I.1.2.4. Végétation et sols [18].....	7
I.1.3. Géographie humaine et économique.....	7
I.1.3.1. Population.....	7
I.1.3.2. Infrastructures de bases existantes	8
I.1.3.3. Principales activités économiques.....	8
I.1.3.4. Regard sur les ressources minérales et activités minières [5]	9
I.2. CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D’ETUDE.....	9
I.2.1. Rappel sur la géologie de Madagascar.....	10
I.2.1.1. Le socle cristallin précambrien de Madagascar [20].....	10

I.2.1.2.	La couverture sédimentaire phanérozoïque.....	11
I.2.1.3.	Les formations volcaniques [14].....	11
I.2.2.	Géologie de la région de Vakinankaratra.....	12
I.2.2.1.	Le socle cristallin précambrien [12] [15].....	13
I.2.2.2.	Les formations volcaniques [14].....	13
I.2.2.3.	Les sédiments lacustres [1] [12].....	14
I.2.2.4.	Cadre tectonique [1] [12] [15].....	14
I.2.3.	Géologie de la zone d'étude proprement dite [1].....	14
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE FER ET L'OR		16
II.1.	LE FER.....	16
II.1.1.	Description [9] [27] [26].....	16
II.1.2.	Les propriétés du fer [9] [27] [26]	16
II.1.3.	Minerais de fer	17
II.1.4.	Les types de gisements de minerais de fer dans le monde.....	17
II.1.4.1.	Les formations de fers rubanés ou BIF [3] [6] [17].....	18
II.1.4.2.	Les minerais oolithiques [6] [17] [22].....	19
II.1.4.3.	Les minerais de ségrégation magmatique [6] [22]	19
II.1.4.4.	Les gisements pyrométasomatiques	20
II.1.4.5.	Les gisements de substitution [6] [22].....	20
II.1.4.6.	Les gisements de concentration secondaire [3] [6]	20
II.1.5.	Les gisements de fer à Madagascar [17] [20]	21
II.2.	L'OR.....	23
II.2.1.	Description.....	23
II.2.2.	Les propriétés de l'or [2] [9] [27]	24
II.2.2.1.	Propriétés physiques	24
II.2.2.2.	Propriétés chimiques.....	25
II.2.3.	Les minéraux aurifères [19]	25

II.2.4.	Géologie de l'or dans le monde	25
II.2.4.1.	Métallogénie [19] [16].....	25
II.2.4.2.	Les types de gisements d'or dans le monde [3] [16] [19]	26
a.	Les gisements primaires de l'or.....	26
b.	Les gisements secondaires d'or	28
II.2.5.	L'or à Madagascar [7].....	28
CONCLUSION PARTIELLE.....		30
PARTIE II : METHODOLOGIE		31
CHAPITRE 3 : METHODE DE TRAVAIL.....		32
III.1.	ORGANIGRAMME.....	32
III.2.	LES DEMARCHES DES TRAVAUX	33
III.2.1.	Les préparatifs.....	33
III.2.1.1.	Travaux de documentation	33
III.2.1.2.	Préparation des équipements	33
III.2.2.	La descente sur terrain	34
III.2.2.1.	Visite de courtoisie	35
III.2.2.2.	Les travaux de reconnaissance et entretien avec les habitants locaux.....	35
III.2.2.3.	Echantillonnage dans les puits de reconnaissance.....	35
III.2.2.4.	Prospection géologique détaillée : lever géologique, mesure et échantillonnage	38
III.2.2.5.	Levers géophysiques.....	38
III.2.3.	Après descente sur terrain	38
III.2.3.1.	Les travaux de laboratoire	38
III.2.3.2.	Cartographie	39
III.2.3.3.	Traitement des résultats	39
CHAPITRE 4 : LE LEVER GEOPHYSIQUE		40
VI.1.	La méthode électrique	40

VI.1.1.	Notion de résistivité et de chargeabilité électriques	40
VI.1.2.	La tomographie de résistivité électrique	41
VI.2.	Le dispositif de Wenner.....	42
VI.3.	Mise en œuvre et acquisition des données.....	43
VI.3.1.	Les matériels	44
I.1.1.	Les profils réalisés	45
CONCLUSION PARTIELLE.....		48
PARTIE III : RESULTATS ET INTERPRETATION		49
CHAPITRE 5 : PRESENTATION DES RESULTATS		50
V.1.	Résultats cartographiques.....	50
V.1.1.	Les formations géologiques de la zone d'étude.....	50
V.1.1.1.	Les roches métamorphiques	50
V.1.1.2.	Les roches volcaniques	55
V.1.1.3.	Les roches magmatiques plutoniques	55
V.1.1.4.	Les sédiments	56
V.1.2.	Aspect structural	57
V.2.	Les résultats d'analyse microscopique.....	60
V.2.1.	Les quartzites à oxyde fer	60
V.2.2.	Les veines de quartz.....	60
V.2.3.	Synthèse des études microscopiques	62
V.3.	Les résultats des traitements des données géophysiques	62
V.3.1.	Traitement des données.....	62
V.3.2.	Les résultats du traitement des données géophysiques électriques.....	63
V.4.	Résultats d'analyse chimique et traitement des données	67
V.4.1.	Les résultats d'analyse chimique	67
V.4.2.	Traitement des résultats d'analyse chimique	68
CHAPITRE 6 : INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSIONS		70

VI.1. Interprétation des résultats	70
VI.1.1. Interprétation des résultats de lever géophysique électrique	70
VI.1.2. Estimation du tonnage d'oxyde de fer de Tongarivo	71
VI.1.1. Le tonnage du minerai	71
VI.1.2. Réserves probables en oxyde de fer	71
VI.2. Discussions	72
IV.2.1. Modèles de mise en place de la minéralisation d'oxyde de fer et or de Tongarivo- Ambohidranandriana	72
IV.2.1.1. La minéralisation d'oxyde de fer de Tongarivo	72
IV.2.1.2. Modèle de mise en place de l'or de Tongarivo	77
CONCLUSION GENERALE	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82
WEBOGRAPHIE	84
ANNEXES	I
Annexe I	I
Annexe II	II
Annexe III	II
Annexe IV	III
TABLES DES MATIERES	IV

Auteur : RAHAJARIVelo Sophie Fanomezantsoa
Adresse : Lot G93 Anganomasina-Soanavela Ambohijanaka
Contact : 033 19 126 27 / 034 09 000 32
Courriel : srahajarivelo@gmail.com

Nombre de pages : 84

Nombre de figures et photos : 59

Nombre de tableaux : 10

Titre : **CHARACTERISATION ET RELATION ENTRE LES GÎTES FERRIFERE ET AURIFERE DE TONGARIVO, COMMUNE RURALE D'AMBOHIDRANANDRIANA, DISTRICT ANTSIRABE II**



RESUME

La géologie de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, District d'Antsirabe II, notre zone d'étude, est dominée par des gneiss et migmatites avec quelques niveaux de micaschistes, amphibolites, quartzites et roches volcaniques. Les quartzites de Tongarivo, un fokontany de la Commune, sont à la fois ferrifères et encaissants des veines de quartz aurifères.

Côté économique, les combinaisons des traitements des résultats d'analyse chimique et de levés géophysiques électriques ont montré que ces quartzites peuvent être exploités économiquement si ce n'est que pour l'oxyde de fer tel le cas de l'Holcim Ibity qui l'utilise en tant qu'ajout dans la fabrication du ciment mais loin d'être suffisants en tant que minerai de fer.

Côté géologique, leurs ressemblances extérieures aux BIF de la Kédia d'Idjil, Mauritanie suggèrent leur appartenance à ce type, leur conférant ainsi un modèle de mise en place par précipitation chimique. Les événements géodynamiques et tectoniques qui se sont succédés ont ensuite généré des fluides hydrothermales lessivant et transportant de l'or. Le fait que l'encaissant soit ferrifère a joué un rôle important dans la précipitation de l'or. Certains obstacles sur terrain nous ont empêchés d'étudier l'extension des quartzites et par la suite celle de la minéralisation aurifère qui semble pourtant économique.

Mots clés : Ambohidrandriana, Tongarivo, minéralisation, oxyde de fer, BIF, or, hydrothermal

ABSTRACT

The geology of the Rural Commune of Ambohidranandriana, district of Antsirabe II, is dominated by gneiss and migmatites with some levels of micaschists, amphibolites, quartzites and volcanic rocks. The quartzites of Tongarivo, one of the fokontany of the Commune are at the same time ferriferous and encase auriferous quartz veins.

In economic side, combinations of the chemical analysis results processing and electric geophysical investigations showed that these quartzites can be exploited economically if it is for the iron oxide like Holcim case that use it as addition in the cement fabrication but wide apart to be sufficient as iron ore.

In geologic side, their exterior similarity to the BIF of Kédia d'Idjil, Mauritania suggest their appartenance to this type thus attributing them a placing model by chemical precipitation. Geodynamic and tectonic occurrences generate later hydrothermal fluids laundering and transporting gold. The ferriferous state of the host was important for the gold precipitation. Some obstacles prohibit us to study the quartzite extension and subsequently the one of gold mineralization that seems however economic.

Key words : Ambohidrandriana, Tongarivo, mineralization, iron oxide, BIF, gold, hydrothermal

Encadreur : Mr. MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques